INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação

ISEL

Gestão do Deslastre de Cargas – Évora como caso de estudo

ANDRÉ RIBEIRO FAGUNDES

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica na Área de especialização de Energia

Orientadores:

Professor José Carlos Lourenço Quadrado
Professora Rita Marcos Fontes Murta Pereira

Júri:

Presidente: Professor Constantino Vital Sopa Soares
Vogais:
Professor José Carlos Lourenço Quadrado
Professora Rita Marcos Fontes Murta Pereira
Professor Victor Manuel Fernandes Mendes

Maio 2013

“Genius is one percent inspiration,
ninety-nine percent perspiration.”
Thomas Edison

Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos meus orientadores todo o apoio que me foi dado para desenvolver esta tese num tema tão amplo como são as *Smart Grids*. As suas críticas construtivas foram fulcrais para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradecer aos meus amigos e colegas, companheiros de longas noites de estudo e que sempre me deram apoio.

Um sentido obrigado à minha família que sempre me deu todo o apoio para que nada faltasse para concluir a minha formação académica.

Resumo

Desenvolve-se neste trabalho uma metodologia para criar um modelo de *demand response*, DR, que pretende auxiliar o utilizador e os operadores da rede de energia elétrica a tirar proveito das informações e da comunicação bidirecional de uma *Smart Grid*.

A metodologia apresentada pretende ser a base para criar um modelo DR que se adapte às necessidades do consumidor e que faça a gestão das cargas, definidas pelo utilizador, de acordo com as informações provindas da rede de energia elétrica, como a potência disponível e o preço da eletricidade. Esta metodologia baseia-se na *lógica fuzzy* associada a técnicas de *clustering* para reconhecer padrões de consumo e implementá-los num controlador *fuzzy*.

Neste trabalho é apresentado um modelo DR a partir da metodologia desenvolvida e aplica-se posteriormente esse modelo a uma residência e a uma rede de energia elétrica. São apresentados e analisados os resultados e por fim retiram-se as conclusões finais do trabalho.

Palavras-Chave

Rede Inteligente; Resposta da Procura; Geração Distribuída; Lógica Difusa; Gestão Activa de Cargas

Abstract

In this work a methodology was developed to create a demand response, DR, model which pretends to help both user and grid operators to exploit the information and the bidirectional communication of a Smart Grid.

The methodology pretends to be the basic tool to create one DR model which adapts to consumption needs and loads management, defined by the user, according with information provided by the electric grid, such as, available power and electricity price. This methodology relies in fuzzy logic and takes advantage of clustering techniques to recognize consumption patterns and implement them in a fuzzy controller.

In this work a DR model is created based on the developed methodology and subsequently this model is applied in a residence and in an electrical grid. The results and analysis are presented as well as the conclusions of the developed work.

Key-words

Smart Grid; Demand Response; Distributed Generation; Fuzzy Logic; *Demand side management*; *Clustering*

Nomenclatura

A_j	Função de pertença
B_j	Valor de saída do controlador *fuzzy*
d_{min}	Constante que representa a mais pequena distância entre o ponto x_k^* e os outros *cluster centers* encontrados
$E_{necessária}$	Energia necessária para carregar as baterias
$E_{baterias}$	Capacidade das baterias
G_i	Matriz constante
h_i	Vetor coluna constante
$h_{carregamento}$	Número de horas de carregamento das baterias
I	Corrente total que transita na rede de energia elétrica
i	Regra do controlador *fuzzy*
n	Número de pontos de informação
P_i	Potencial do ponto de informação x_i ser *cluster center*
P_k^*	Potencial ponto de informação x_k^* ser *cluster center*
P_1^*	Valor do potencial do ponto de informação com maior potencial de ser *cluster center*
P_{tomada}	Potência tipicamente disponível numa tomada de uma residência
P	Potência de perdas por efeito de Joule
q	Elemento do universo de discurso
R	Resistência total da rede de energia elétrica

r_a	Constante positiva que representa o raio que define até que distância é que um ponto de informação é considerado vizinho
r_b	Constante positiva cujo valor ditará até que distância é que um ponto de informação sofrerá a redução do valor potencial de ser um *cluster center*
y_{ij}^*	j-enésimo elemento de y_i^*
y	Vetor de entrada
Y_j	j-enésima variável de entrada
y_i^*	Coordenadas das variáveis de entrada do *cluster center*
x_i	i-enésimo ponto de informação de um conjunto de dados
x_j	Ponto de informação vizinho de x_i
x_c^*	c-enésimo *cluster center* no espaço de dimensão M
x_k^*	k-enésimo *cluster center*
x_1^*	*Cluster center* com maior valor potencial
z	Variável de saída
z_i^*	Coordenadas das variáveis de saída do *cluster center* x_i
z_{ij}^*	*j*-enésimo elemento de z_i^*
Z_j	j-enésima variável de saída
α	Constante auxiliar para o cálculo do potencial ser *cluster center*
β	Constante auxiliar para cálculo da redução do potencial de ser

cluster center

$\overline{\varepsilon}$	Potencial a partir do qual se aceita definitivamente o ponto de informação como *cluster center*
$\underline{\varepsilon}$	Potencial abaixo do qual se rejeita definitivamente o ponto de informação como *cluster center*
η	Rendimento dos inversores
μ_i	Grau de pertença do vetor *y* em relação à regra *i*
ρ_i	Média ponderada dos μ_i
$\rho_{i,j}$	ρ_i avaliado por y_j

Índice

Índice de Figuras

Índice de Tabelas

Lista de Acrónimos

DR – *Demand response*

DSM – *Demand Side Management*

AMI – *Advanced Metering Infrastructure*

DLC – *Direct Load Control*

EDRP – *Emergency Demand Response Program*

CAP – *Capacity Market Program*

A/S – *Ancillary Service Markets*

TOU – *Time-Of-Use*

RTP – *Real Time Pricing*

CPP – *Critical Peak Pricing*

EDP – Eletricidade de Portugal

ERDF - *Électricité Réseau Distribution France*

Estrangeirismos

Ao longo desta dissertação utilizam-se alguns estrangeirismos fundamentalmente por dois motivos. O primeiro refere-se a palavras que ainda não se encontram, segundo os conhecimentos do autor, definidas na língua portuguesa ou a sua tradução não é consensual, e o segundo refere-se a palavras em que a mera tradução linguística faz perder todo o significado técnico atribuído às mesmas no original.

O caso da palavra *fuzzy* enquadra-se nesta segunda situação, em que a tradução linguística, não só não encontrou nos meios científicos ainda num consenso, apresentando-se ainda alternativas como: difuso, graduado, nubloso, etc., como, segundo o autor, nenhuma das últimas representa a verdadeira essência da teoria em causa desde a sua definição.

A utilização de palavras inglesas como *software*, já há algum tempo se generalizou, não sendo por esse motivo traduzidas. Também no meio técnico-científico restrito da engenharia são utilizadas frequentemente palavras inglesas, as quais representam conceitos largamente difundidos, motivo pelo qual não se traduzem neste trabalho, como são os casos das palavras *clustering*, *demand response* e *demand side management*.

Todos os estrangeirismos, referidos ao longo deste trabalho, são assinalados em itálico.

Capítulo 1

Introdução

Resumo

Neste capítulo apresentam-se as motivações que levaram à elaboração deste trabalho bem como o seu enquadramento. São definidos os objetivos a alcançar e apresenta-se a estrutura do trabalho.

1.1. Motivação do trabalho

No domínio da *Smart Grid* o papel do consumidor é dotado de considerável relevância no contexto de uma gestão da rede de energia elétrica que cumpre os requisitos de promover a eficiência energética e a calendarização e deslastre das cargas que melhor serve o consumidor.

A gestão do consumo das cargas promove a eficiência energética procurando o equilíbrio entre a geração e a carga. Esse equilíbrio passa por conseguir satisfazer as necessidades do consumidor com a geração disponível recorrendo-se à calendarização ou deslastre das cargas perseguindo-se assim o objetivo de não aumentar a geração, que acarreta custos, tais como a construção de novas centrais e maior emissão de gases de efeito de estufa, e satisfazer a carga.

O aumento da potência requerida pelo consumidor, o aumento dos gases de efeito de estufa bem como o aumento do preço dos combustíveis fósseis e o seu provável desaparecimento num futuro próximo, levam a que sejam procuradas soluções no sentido de diminuir os efeitos prejudiciais destes fatores tanto ao nível económico como ao nível ambiental. Para mitigar estes efeitos, pretende-se introduzir cada vez mais geração de fonte renovável na rede de energia elétrica, bem como generalizar a utilização do veículo elétrico. O veículo elétrico será mais uma carga que terá impacto na rede de energia elétrica pois fará aumentar a necessidade energética dos consumidores e portanto pode influenciar o funcionamento da rede de energia elétrica através da sobrecarga das linhas de transporte e distribuição, ou ter impacto nos níveis de tensão e de frequência. A sua importância no processo de melhoraria da eficiência energética advém do facto da sua força motriz não emitir gases de efeito estufa bem como do facto de ser um veículo que pode armazenar energia elétrica através das suas baterias.

Neste trabalho é dada ênfase ao consumidor pois o seu papel é fundamental visto ser quem irá gerir as suas cargas e por conseguinte terá de ser persuadido a aderir à *Smart Grid*. É necessário que o consumidor tenha o

conhecimento suficiente para tirar partido da *Smart* Grid pois só assim o consumidor e a rede de energia elétrica serão beneficiados com a transição da rede atual para a *Smart Grid*.

Deste trabalho resultou a publicação de um artigo na *4thDoctoral Conference on Computing, Electrical and Insdustrial Systems*.

Por último, convém referir que devido à falta de acesso aos dados da rede de energia elétrica de Évora, dos *distributed transformer control* e das *energy boxes* não foi possível utilizar Évora como caso de estudo, tal como indicado no nome desta tese. No entanto utilizou-se uma rede de energia elétrica baseada em [1] para que fosse possível concluir sobre o impacte do modelo DR com e sem a integração do veículo elétrico.

1.2. Enquadramento do trabalho

Este trabalho foi desenvolvido no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa com vista à obtenção do grau de mestre em Engenharia Eletrotécnica no ramo de energia.

1.3. Objetivos da dissertação

O presente trabalho constitui um estudo e análise com base em cenários de gestão de cargas pelo consumidor.

Genericamente, o papel do consumidor baseia-se em gerir as suas cargas de forma a ser beneficiado economicamente e a melhorar a eficiência energética da rede.

Os objetivos desta dissertação são:

1) Conhecer o estado da arte da rede de energia elétrica e da *Smart Grid*;
2) Descrever os conceitos de *demand side management* (DSM) *e demand response* (DR);
3) Analisar o impacto de um modelo DR numa residência e numa rede de energia elétrica;

4) Estudar os efeitos da integração do veículo elétrico numa residência e numa rede de energia elétrica com a aplicação de um modelo DR.

1.4. Estrutura da tese

Este trabalho encontra-se estruturado em 5 capítulos, em que o primeiro capítulo apresenta as motivações e enquadramento do trabalho bem como os objetivos a atingir. No segundo capítulo apresentam-se a rede de energia elétrica tradicional e os benefícios da transição para as *Smart Grids*. Introduzem-se e explicam-se os conceitos de DSM e DR, bem como o impacte provável do veículo elétrico na rede de energia elétrica. No terceiro capítulo apresenta-se a metodologia utilizada para a elaboração de um modelo DR, bem como as técnicas e *software* envolvidos na sua implementação. No quarto capítulo analisa-se o impacte do modelo DR numa residência e numa rede de energia elétrica, considerando também a integração do veículo elétrico. Por fim, no quinto capítulo, apresentam-se as conclusões do trabalho.

Capítulo 2

Estado da arte

Resumo

Neste capítulo carateriza-se a rede de energia elétrica tradicional e a *Smart Grid* e identificam-se os pontos em que esta poderá trazer benefícios à rede de energia elétrica. Explica-se o conceito de *demand side management* (DSM) e *demand response* (DR). Por fim apresentam-se os impactes que o veículo elétrico poderá ter na rede de energia elétrica.

2.1. Evolução das *Smart Grids*

2.1.1. Rede de energia elétrica tradicional

A rede de energia elétrica de hoje, que gera e transporta energia elétrica até aos consumidores, utiliza um sistema sustentado em tecnologia que remonta às décadas de 50 e 60. Portanto pode concluir-se que a rede de energia elétrica atual não tira partido das novas tecnologias e simultaneamente enfrenta os desafios da atualidade, tais como o crescente consumo, o aumento das emissões de gases nocivos ao ambiente ou a menor acessibilidade aos combustíveis fósseis e o encarecimento dos mesmos, utilizando tecnologia do passado. Esta tecnologia consiste em equipamentos obsoletos e envelhecidos que colocam em perigo a fiabilidade e sustentabilidade da rede [2].

Na Europa, de acordo com [3], as metas propostas para 2020, como a redução em 20% das emissões dos gases de efeito de estufa e do consumo de energia primária e o aumento para 20% de fontes renováveis de energia, bem como as politicas energéticas da União Europeia, segurança de fornecimento, sustentabilidade e mercado de eficiência, são vistos como fatores externos que pressionam a evolução da rede de energia elétrica. Isto deve-se ao facto de, por exemplo, os setores como os de transporte e aquecimento serem vistos como improváveis de atingir a meta de 20% de fontes renováveis de energia, exigindo-se assim uma compensação ao setor de geração elétrica. Prevê-se que o aumento da geração elétrica a partir de fontes renováveis tenha de ser entre os 30% e os 35% para que se atinja a meta dos 20% de fontes renováveis de energia na Europa. Isto significa que a rede de energia elétrica tem de evoluir, por exemplo, no sentido de conseguir integrar de forma eficaz a geração distribuída.

Na literatura encontram-se vários estudos sobre que alterações na rede de energia elétrica são necessárias para que esta possa evoluir e que desafios enfrenta. De acordo com [2] [4], estas evoluções e desafios são os seguintes:

- Conseguir responder à crescente procura de energia;
- Modernizar os seus equipamentos;
- Acomodar de forma fácil e eficaz as fontes renováveis de energia;
- Permitir maior participação do consumidor no processo de gestão da energia da rede;
- Melhorar a sua eficiência energética;
- Reduzir as emissões de gases de efeito de estufa;
- Reduzir ao máximo a necessidade de construção de novas centrais de fonte de energia não renovável.

De forma a compreender os pontos onde é necessária a evolução da rede de energia elétrica atual, com o objetivo de superar os desafios enumerados anteriormente, é preciso entender a forma como a rede de energia elétrica funciona, bem como conhecer as suas principais características. As principais características da rede de energia elétrica tradicional, segundo [5] [6] [7], são:

- Geração centralizada;
- Fluxo de energia unidirecional;
- A monitorização da rede em tempo real resume-se principalmente à geração e transmissão de energia;
- Dificuldade em integrar a geração distribuída;
- Falta de interação entre os diversos operadores da rede: geração, transmissão, distribuição e consumidor final;
- O aumento da procura de energia e a falta de investimento na rede elétrica diminuiu a estabilidade da mesma.

A Figura 2.1 representa a estrutura da rede atual. É possível observar a hierarquia da rede, em que a geração centralizada está no topo e o consumidor está na base. A rede de energia elétrica tradicional carateriza-se por ter 3 disciplinas distintas, sendo elas a geração, a transmissão e a distribuição.

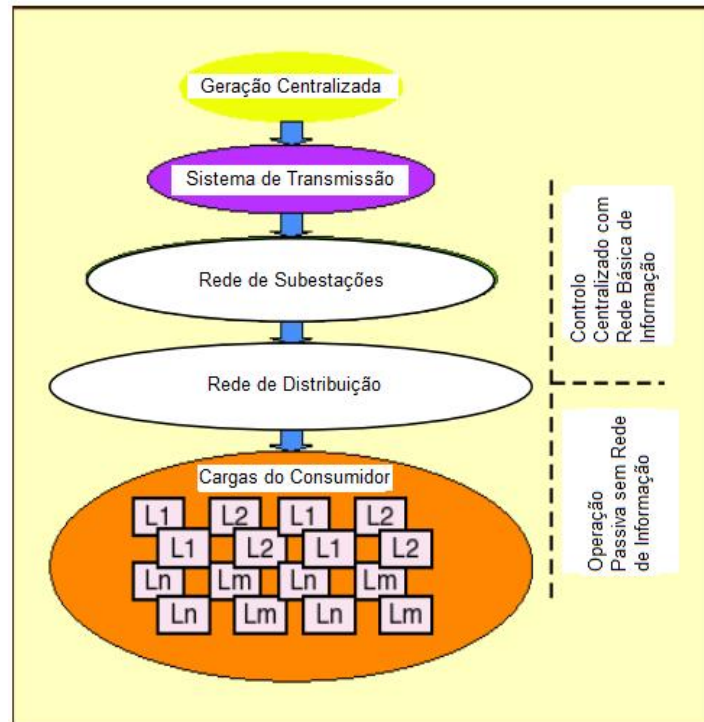



Figura 2.1 – A rede atual [7].

Geralmente a monitorização é efetuada ao nível da geração e transmissão. Devido à falta de interação entre estas e a distribuição e o consumidor, pode resultar uma falha de deteção de interrupções de energia. Estas interrupções podem originar um efeito em cadeia e dependendo das interligações pode levar a “apagões” afetando cidades e países vizinhos [8].

A capacidade de transporte da rede de energia elétrica tradicional, nalgumas situações, está a chegar ao limite, sendo que, para superar esta situação seria necessário construir novas linhas [7]. No entanto, algumas comunidades não querem este tipo de infraestruturas nas suas áreas e além disso essa construção também acarreta custos. Isto leva a que se procure otimizar a utilização de energia para evitar a construção de novas linhas [7]. Também o facto da rede de energia elétrica não ter um sistema que permita a comunicação entre todas as entidades intervenientes, não permite obter informação em tempo real da qualidade da energia elétrica entregue ao consumidor.

Outro dos problemas da rede de energia elétrica tradicional é o facto da sua monitorização e restabelecimento de energia serem, em grande parte, manuais. Para este facto contribui o défice de sensores presentes na rede bem como o excesso de aparelhos eletromecânicos no lugar dos atuais aparelhos digitais [9]. Embora sistemas como *supervisory control and data acquisition*, SCADA, já tenham sido implementados na rede de energia elétrica tradicional como forma de prever e restaurar falhas.

De acordo com [10], o consumo global de gás e petróleo na Europa estão a aumentar e como consequência aumenta a dependência desta das importações dessas matérias-primas. Prevê-se que a dependência do gás suba para 80% dentro de 25 anos e a dependência do petróleo aumentou em 20% desde 1994, sendo o aumento é estimado em 1.6% ao ano. Esta situação é preocupante porque, de acordo com [10], os preços do petróleo e gás estão a aumentar assim como o preço da eletricidade. Para o consumidor este facto é preocupante pois vê a sua fatura da eletricidade aumentar. Assim, é necessário adaptar a rede de energia elétrica tradicional a esta nova realidade. Uma realidade onde as fontes renováveis de energia poderão fornecer energia elétrica à rede a partir de qualquer ponto, onde até mesmo o consumidor final deixa de ser apenas uma carga para o sistema passando também a ser um gerador de energia elétrica.

A necessidade de evolução perante este cenário prende-se com o facto do fluxo de energia passar a ser bidirecional, quando a rede de energia elétrica tradicional está preparada apenas para um fluxo unidirecional. Também o facto das fontes renováveis de energia serem intermitentes leva a que se evolua no sentido de otimizar a sua utilização para que a energia por elas gerada não seja desperdiçada e não tenha impactes na tensão ou na energia reativa que sejam nefastos à qualidade de energia elétrica fornecida.

Numa perspetiva de mercado, o facto da rede de energia elétrica tradicional não possuir comunicação bidirecional faz com que, quer as entidades responsáveis pelo fornecimento de energia elétrica quer o consumidor não possam tirar partido das flutuações dos preços da eletricidade ao longo do dia. Através de um mecanismo de bidirecionalidade poder-se-ia convencer os

consumidores a diminuírem o seu consumo nas horas onde este é mais elevado, evitando-se assim possíveis constrangimentos na rede.

Na Figura 2.2 apresenta-se um esquema síntese com as debilidades da rede de energia elétrica tradicional.

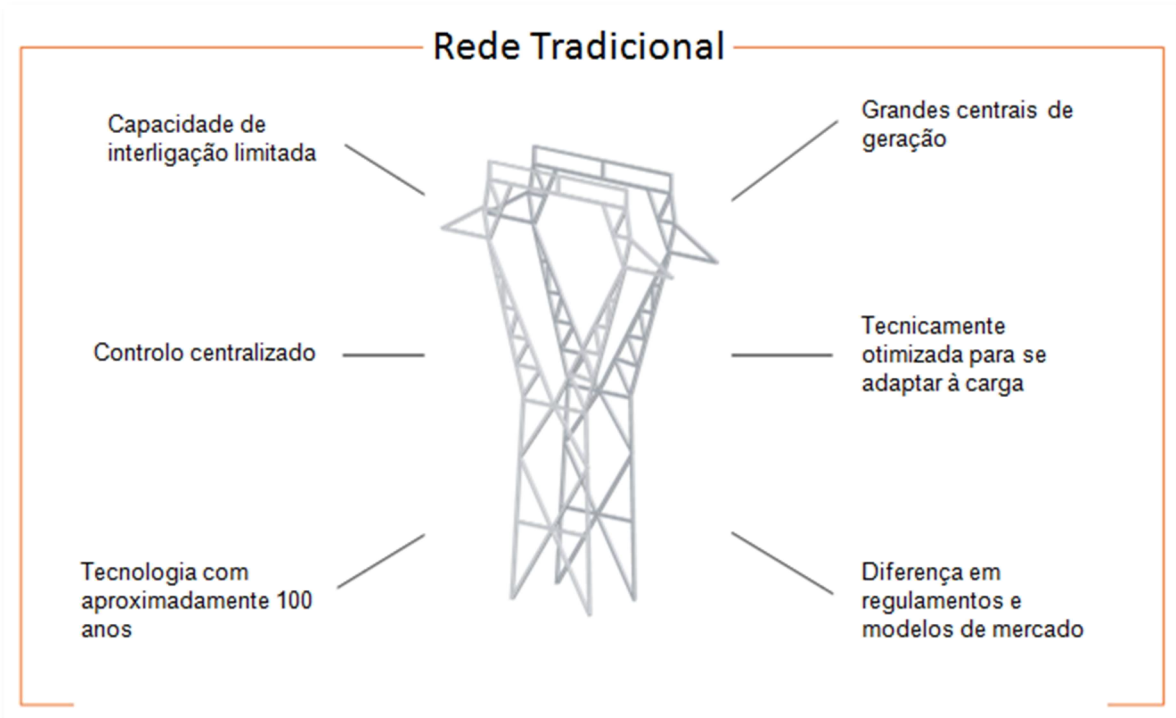



Figura 2.2 – Síntese das debilidades da rede elétrica [11].

2.1.2. *Smart Grid*

O conceito de *Smart Grid* surge em resposta à necessidade de evolução e otimização da rede tradicional de transporte e distribuição de energia elétrica, apresentada em 2.1.

A rede de energia elétrica do futuro terá como objetivos minimizar os custos e impactes ambientais e maximizar a fiabilidade e estabilidade da mesma. Espera-se que estes objetivos sejam atingidos coordenando as necessidades e capacidades dos *stakeholders* dos mercados elétricos, de todos os produtores, operadores da rede e consumidores finais.

Pretende-se com esta solução integrar na rede de energia elétrica as tecnologias de baixa produção de dióxido de carbono, como as fontes renováveis de energia e os veículos elétricos e otimizar a rede de energia elétrica, no que concerne, por exemplo, ao consumo diário de energia elétrica e perdas de energia elétrica [12].

O conceito *Smart Grid* não tem uma definição unânime. É uma matéria sobre a qual muito se debate devido às grandes expectativas que se depositam neste conceito. Existem várias definições de *Smart Grid* e de acordo com [13], duas dessas definições são as seguintes:

- Uma *Smart Grid* é uma rede de energia elétrica que consegue integrar qualquer tipo de geração e consumidor assegurando ao mesmo tempo, eficiência económica, um sistema de energia elétrica sustentável com baixas emissões de carbono e de elevada qualidade de energia bem como garantir um sistema fiável e seguro;
- A *Smart Grid* representa a oportunidade de transformar um sistema de geração centralizada e controlada pelos produtores, para uma rede onde a geração é menos centralizada e mais interativa com o consumidor trazendo as filosofias, conceitos e tecnologias que possibilitam a utilização da Internet nas entidades fornecedoras de energia elétrica e na rede de energia elétrica.

De acordo com [11], na União Europeia, a visão de uma *Smart Grid* passa por um processo de investigação, desenvolvimento e implementação que permita obter uma rede de energia elétrica que satisfaça as necessidades energéticas da Europa no futuro. Para se alcançar este objetivo, esta rede deverá ser:

- Flexível - Satisfazendo as necessidades do consumidor e ao mesmo tempo respondendo aos desafios e imprevisibilidades do futuro;
- Acessível - Garantindo acessibilidade a todos os utilizadores da rede, particularmente às fontes renováveis de energia e a

geradores locais de grande eficiência com zero ou baixas emissões de gases de efeito de estufa;

- Fiável - Assegurando e melhorando a segurança e qualidade do fornecimento de energia elétrica, tendo em conta as vantagens da era digital com resiliência a riscos e incertezas;
- Económica - Promovendo mais-valias através da inovação, gestão da eficiência energética e competitividade e regulação do *level playing field*.

A implementação de uma rede de energia elétrica com as características mencionadas nos pontos anteriores é algo que ainda se debate e se afigura difícil. As características e as inovações necessárias são unânimes, o problema está em encontrar a forma de por em prática todas essas caraterísticas e inovações. Vários autores [7] [14] delinearam as características que a *Smart Grid* deverá ter para que os objetivos anteriormente mencionados sejam alcançados. Seguidamente enumeram-se as principais características:

Criar uma rede que consiga lidar, autonomamente, com os problemas que nela surjam, tais como curto-circuitos;

Criar uma rede que consiga integrar o aumento de geração distribuída em qualquer ponto da rede;

- Criar uma rede capaz de armazenar grandes quantidades de energia;
- Criar uma rede que promova a comunicação entre todos os operadores da rede elétrica e o consumidor;
- Criar uma rede que seja resistente a ataques físicos e ciber ataques;
- Criar uma rede que minimize as despesas de operação e manutenção;
- Criar regulamentações e normalizações europeias de harmonização para promover tanto o comércio de energia como de serviços ligados à rede;

- Estabelecer protocolos normalizados permitindo uma fácil comunicação entre equipamentos.

A Figura 2.3 apresenta a evolução da rede de energia elétrica ao longo do tempo, elucidando a evolução até ao presente bem como o que se pretende para o futuro.

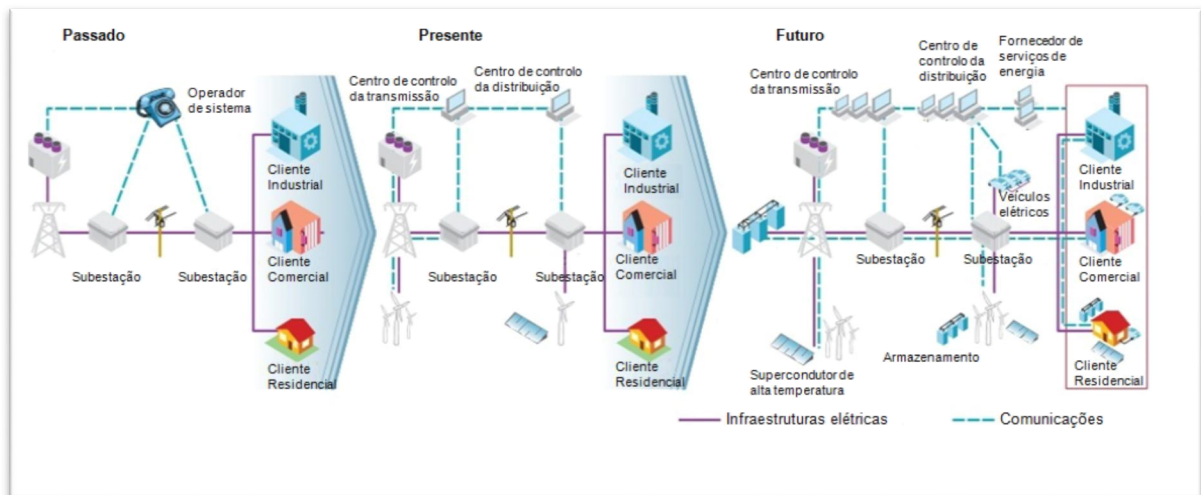



Figura 2.3 - Evolução da rede de energia elétrica [12].

Na Tabela 2.1 enunciam-se algumas das principais diferenças que a *Smart Grid* apresenta em comparação com a rede de energia elétrica tradicional.

Tabela 2.1 – Principais diferenças entre a rede tradicional e a *Smart Grid*

Rede tradicional	*Smart Grid*
Eletromecânica	Digital
Comunicação unidirecional	Comunicação bidirecional
Geração centralizada	Geração distribuída
Poucos sensores	Muitos sensores
Serviços pouco diferenciados	Serviços muito diferenciados
Monitorização manual	Automonitorização
Restauração manual	Autorestauração

A rede de energia elétrica será a principal agente para a implementação da *Smart Grid*. Ela é responsável pelo trânsito de energia que possibilita ao consumidor utilizar a energia elétrica disponibilizada pelos geradores e no futuro será também a responsável pela interação entre todas as entidades da rede de

energia elétrica, desde a geração ao consumidor, através da comunicação bidirecional [15]. O sistema de gestão da rede tenderá a evoluir do sistema atual de gestão de energia elétrica para o sistema denominado *Virtual Power Plant*. Com este sistema pretende-se aumentar o controlo sobre o trânsito de energia para assegurar a integração eficaz da geração distribuída [16], [17]. A implementação deste sistema de gestão permitirá que programas e serviços como *demand response* possam ser uma realidade, pois o sistema *Virtual Power Plant* determinará que geração é admissível e em que locais, de acordo com o estado da rede.

Com a *Smart Grid* o consumidor será convidado a envolver-se mais na gestão da energia elétrica, bem como na sua utilização. Com a ampla aplicação do mercado elétrico e com o sistema *Virtual Power Plant*, o preço da eletricidade passa a ser disponibilizado em tempo real e a potência disponível deixa de seguir a carga mas sim o contrário, sendo este um dos caminhos apontados para a sustentabilidade da rede.

A ampla aplicação do mercado elétrico, bem como a implementação do sistema *Virtual Power Plant* dependem da inovação tecnológica e da capacidade dos países superarem barreiras regulamentares que atualmente são muito diferentes de país para país. De acordo com [13], existem várias entidades que já desenvolveram trabalho no sentido de harmonizar as normas que regem as tecnologias que permitem a evolução em direção à *Smart Grid*. A *International Electrotechnical Comission Strategy Group*, IEC, é uma dessas entidades tendo criado normas para tecnologias que abrangem áreas tão distintas como: *Advance Metering Infrastructure* (AMI), *Distribution Automation, Distribution Management System* (DMS), *Demand Response, Substation Automation, Smart Home*, etc.

O conjunto das tecnologias relacionadas com a AMI será uma das bases da *Smart Grid* e terão um papel fundamental na troca de dados entre o consumidor e a geração.

Esta infraestrutura baseia-se em tecnologias de comunicação e está diretamente relacionada com os programas de *Demand Response*. Para que seja

tirado o máximo proveito desta infraestrutura é necessário que o preço do mercado elétrico seja obtido em tempo real e que os *smart meters* sejam amplamente instalados de forma a permitir a leitura e envio dos dados do consumo recorrendo à comunicação bidirecional. Na Tabela 2.2 indicam-se as tecnologias que fazem parte da AMI.

Tabela 2.2 – Tecnologias incluídas na AMI [13]

Equipamento	Descrição
Smart Meter	É um aparelho programável que permite um maior número de leituras e funções que os contadores de energia tradicionais.
Wide-area communication infrastructure	Esta infraestrutura será responsável pela comunicação contínua entre o consumidor, geração e as cargas controláveis.
Home area networks (HANs)	Destina-se a controlar os *smart meters* e as cargas controláveis ao nível local.
Meter Data Management System (MDMS)	É responsável por guardar e analisar a informação recolhida.
Operational Gateways	Esta componente da AMI destina-se a relacionar o consumidor a aplicações exteriores ao sistema.

Através da AMI, o consumidor tem acesso à informação sobre os preços e a potência disponível ao longo do dia, podendo decidir a que horas devem colocar os seus equipamentos domésticos a funcionar para que a sua fatura seja a mais reduzida possível. Por outro lado, esta infraestrutura também permite que a eficiência da rede de energia elétrica seja melhorada, pois permite influenciar o consumidor de forma a, por exemplo, reduzir o seu consumo nas horas de pico aumentando o preço da eletricidade nessas horas. Também permite o acesso aos diagramas de consumo, o que auxilia na decisão sobre o planeamento da rede.

Ao nível mundial já existem projetos onde o conceito de *Smart Grid* é aplicado. De acordo com [18] muitos países europeus já têm projetos onde as

Smart Grid ou tecnologias relacionadas com esta são testadas e analisadas com vista à sua ampla aplicação.

Na grande maioria dos países envolvidos em projetos relacionados com *Smart Grid*, implementação de *smart meters* é um ponto em comum entre eles. Em Portugal, através da EDP, o projeto INOVGRID substituiu os contadores de energia tradicionais pelas *energy boxes,* ou *smart meters*. Este projeto também instalou os *Distributed Transformer Controler*, com o objetivo de gerir a informação enviada pelas *energy boxes*. Em Espanha, a Iberdrola Distribuición lançou o projeto Star, que visava a instalação de *smart meters* com o objetivo de criar um sistema, denominado *Advanced Metering Management*, que pudesse fazer a gestão da informação recolhida. Em França, a ERDF propôs-se a instalar 300 mil *smart meters*, até 2011, com vista à criação também de um sistema denominado *Advanced Metering Management*.

Fora da Europa, também estudos piloto foram efetuados. Em [19] é possível observar onde a nível mundial existem projetos relacionados com *Smart Grid*.

2.2. *Demand Side Management*

A gestão da energia no sector elétrico é um assunto discutido já alguns anos, tendo ganho preponderância a partir dos anos 70 com a crise petrolífera [20]. Em 1985 [21] já se discutia o impacte e que alternativas existiam na área do DSM. Algumas dessas alternativas têm validade nos dias de hoje, tais como: preenchimento das horas de vazio, diminuição dos picos de consumo, mudança de cargas para horas de vazio, conservação da energia para diminuir o consumo, entre outras. No entanto, o surgimento do conceito *Smart Grid*, apresentado em 2.1.2, permitiu que se olhasse para este tipo de programa de uma forma mais ambiciosa, sobretudo devido à instalação de *smart meters* nos edifícios domésticos e de serviços, bem como a comunicação bidirecional disponível neste tipo de rede.

Se anteriormente apenas se pensava nas grandes indústrias com grandes potências, atualmente já se procura aplicar DSM aos edifícios comerciais e

domésticos, uma vez que a energia neste tipo de edifícios tem vindo a aumentar. Segundo [22], no período decorrente entre 1990 e 2009, a energia na Europa a 27 aumentou em 26.4%, sendo que o sector dos serviços e doméstico aumentou em 66.8% e 39%, respetivamente. Na Indústria o consumo de eletricidade foi reduzido em 0.7%. Em Portugal, de acordo com [23], o sector doméstico aumentou o consumo de energia elétrica. Se em 1989 representava 15.9% do total da energia consumida, em 2010 tinha um peso de 44.1%. O consumo doméstico aumentou em 5% desde 1997 a 2008 bem como no sector dos serviços e agricultura. Já a indústria, no mesmo período de tempo, apenas aumentou 1.8%.

Segundo [24], a União Europeia pretende atingir uma redução de 1% no consumo de energia durante 9 anos tendo este programa começado em 2008.

A DSM é um dos mecanismos para atingir essa redução. A DSM pretende alterar a curva de evolução do consumo energético dos consumidores nos vários sectores de atividade económica, beneficiando quer consumidores quer operadores da rede com a redução nos custos de operação do sistema [25].

Na literatura encontram-se várias definições para DSM. De seguida apresentam-se algumas dessas definições:

- De acordo com [25], pressupõe a identificação e implementação de iniciativas que melhoram a utilização da capacidade instalada pelo produtor/fornecedor de energia designado por operador, através da alteração das características da procura de energia;
- De acordo com [21], relaciona-se com o planeamento e implementação das atividades dos operadores da rede elétrica que influenciam a utilização do consumidor por forma a alterar a curva de consumo;
- De acordo com [26], representa os passos dados pelos operadores da rede elétrica e o consumidor que promovem a mudança da quantidade ou tempo do consumo de energia.

Assim, a DSM, de acordo com [27], pretende atingir os seguintes objetivos:

- Reduzir os picos de procura de eletricidade;
- Promover a eficiência energética;
- Integrar as fontes renováveis de energia.

Reduzindo-se os picos de procura de eletricidade evita-se a construção de centrais elétricas, bem como de linhas de transmissão de energia, apenas por causa desse pico e facilita-se a compensação da falta de geração com a energia armazenada. Ao promover a eficiência energética pretende-se tirar o máximo partido da energia gerada evitando-se desperdícios. Quanto à integração das fontes renováveis de energia, a DSM pode incitar o consumidor a alterar os seus padrões de consumo conforme a existência de mais ou menos geração de energia renovável. Para além destas vantagens, existem também as vantagens ambientais, tais como redução da emissão de gases nocivos ao ambiente.

Para atingir estes objetivos existem várias estratégias associadas à DSM. De acordo com [26] essas estratégias passam pela eficiência energética, conservação de energia e DR. Como apresentado na Figura 2.4, todas elas são complementares e relevantes para a diminuição da fatura energética.

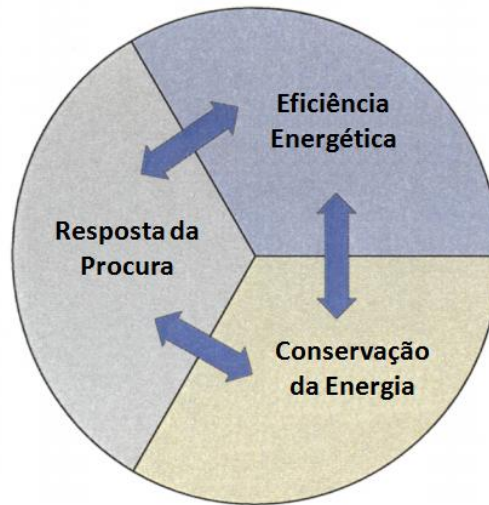



Figura 2.4 – Estratégias dos programas de DSM [28].

A eficiência energética representa as ações tomadas no sentido de substituir aparelhos por outros que cumpram, pelo menos, os mesmos propósitos mas utilizando menos energia, bem como a eliminação de perdas no sistema. Exemplo disso é a substituição de lâmpadas incandescentes por lâmpadas fluorescentes, auditorias energéticas para evitar gastos desnecessários, por exemplo, com ares-condicionados e ventiladores ou identificando e reparando fugas em sistemas de ar comprimido. Com a conservação de energia pretende-se utilizar a energia o menos possível. Um cenário possível seria, esperar até que a máquina de secar e lavar estejam completamente cheias e só depois a colocar em funcionamento, usar roupa leve no verão para dar a menor utilização possível a ventiladores. Relativamente à DR, esta estratégia permite adaptar a carga à geração existente sendo uma medida para integrar a energia elétrica proveniente das fontes renováveis de energia. O consumo deve ser incentivado para que a geração proveniente das fontes renováveis de energia seja aproveitada. Na situação em que essas fontes não geram incentiva-se a contração do consumo. Neste estudo, será dada enfase à *demand response*.

Considera-se que a DR também será um catalisador para o mercado energético representando oportunidades de negócio aos vários operadores da rede, incluindo o consumidor, através da flutuação do preço da eletricidade ao

longo do dia. No entanto, esta é uma vertente que não será objeto de estudo neste trabalho e portanto a sua explicação não será alongada.

Vários autores definiram DR. De seguida apresentam-se algumas dessas definições:

- De acordo com [29], refere-se a um conjunto de ações que poderão ser tomadas no lado do consumidor em resposta a condições particulares dentro do sistema elétrico, tais como períodos de pico, congestionamento da rede ou preços elevados;
- De acordo com [30] será qualquer programa que permita ou incentive o consumidor a diminuir ou a trocar as horas da energia que consome durante os períodos em que a energia é mais cara.

A sua implementação depende da aderência dos consumidores, visto que esta é uma solução que afeta os hábitos dos consumidores, pois obriga a que estes sejam flexíveis quanto ao horário de funcionamento dos seus aparelhos. Esta gestão dos horários de funcionamento será feita de acordo com as necessidades da rede, no entanto as preferências do consumidor serão sempre salvaguardadas. No entanto, obrigará sempre à alteração de comportamentos e/ou rotinas por parte do consumidor. Exemplo disso é a alteração de algumas rotinas para colocar alguns equipamentos a funcionar a determinadas horas quando a eletricidade tem um preço menor.

Com esta ferramenta, de acordo com [31], pretende-se atingir dois objetivos. O primeiro objetivo é constituir uma nova ferramenta que, a curto e a médio prazo, minimize o impacte das restrições técnicas, tais como originar sobrecargas nas linhas, a sobrelevação de tensão na rede de energia ou mesmo o colapso do sistema elétrico, ajustando o consumo à geração disponível. A longo prazo pretende-se reduzir as necessidades de investimento no sistema elétrico bem como reduzir os congestionamentos na rede elétrica. Relativamente ao segundo objetivo, pretende-se reduzir os custos da eletricidade do consumidor, sem modificar o seu grau de conforto, mudando as cargas para intervalos de tempo onde o preço da eletricidade é menor.

Em suma, com a DR pretende-se moldar a curva da procura para que esta seja o mais uniforme possível e com um consumo menor de forma a otimizar os recursos. Relativamente ao impacte esperado dos programas de DR estes podem ser sintetizados nos seguintes tópicos:

- Diminuição dos picos de consumo;
- Preenchimento do diagrama de carga nas horas de vazio;
- Alterar os horários de funcionamento das cargas.

Apesar das vantagens enumeradas anteriormente, a implementação dos programas de DR está a fazer-se de forma lenta. Ainda existem barreiras para que estes programas sejam amplamente adotados. De acordo com [32], existem barreiras financeiras, regulamentares, tecnológicas e culturais.

Em termos financeiros, a dificuldade passa por angariar investimento suficiente para implementar as tecnologias necessárias, tais como *smart meters* ou sistemas de gestão de informação, e garantir a recuperação do investimento. Existem algumas situações em que a DR aumentou o consumo de energia elétrica nas horas de pico, o que em termos financeiros é prejudicial. Em relação às barreiras regulamentares, existe o problema das entidades geradoras de energia, com presença em múltiplos estados/países, terem de se adaptar a diferentes regulamentos. Isto dificulta a implementação das tecnologias em larga escala, bem como, o problema de ter que conseguir aprovação das suas tecnologias para diferentes regulamentos. Outra barreira, passa pela distribuição dos custos da implementação da tecnologia, que se for apenas pelos participantes, poderá ser elevado e portanto reduz os interessados. O problema de existirem poucos participantes resulta num impacto reduzido na curva de consumo e por conseguinte não traz benefícios significativos, quer para as entidades geradoras de energias quer para os consumidores. Por fim, as barreiras tecnológicas e culturais estão algo relacionadas entre si. As grandes entidades geradoras têm sistemas complexos e interdependentes, assim as novas tecnologias têm de ter a capacidade para lidar com tecnologia atual de forma que as novas tecnologias vão sendo integradas ao longo do tempo, causando o mínimo de contingências. Esta integração ao longo do tempo é necessária pois

uma mudança radical na tecnologia poderia por em causa o bom funcionamento destes sistemas e com isso haver a probabilidade de um efeito de falha em cascata. Este risco de falha, aliado à cultura relutante das grandes empresas em aderir a novas tecnologias devido à incerteza do investimento, leva a que as tecnologias necessárias ao bom funcionamento da DR não sejam implementadas de forma célere.

Posto isto, de seguida apresentam-se as várias estratégias de DR.

Os programas de DR, segundo [33], podem ser divididos em duas categorias: *Incentive-based programs* e *Time-based programs*. Dentro de cada categoria existem subgrupos que serão enunciados a seguir.

Os subgrupos da categoria *incentive-based programs* são:

- *Direct Load Control* (DLC);
- *Interruptible servisse*;
- *Demand Bidding*;
- *Emergency Demand Response Program* (EDRP);
- *Capacity Market Program* (CAP);
- *Ancillary Service Markets* (A/S).

Os subgrupos da categoria *time-based programs* são:

- *Time-Of-Use* (TOU) *program*;
- *Real Time Pricing* (RTP) *program*;
- *Critical Peak Pricing* (CPP) *program*.

Os programas do tipo *incentive-based* são baseados em bonificações mediante objetivos que foram cumpridos. O consumidor, por exemplo obtém descontos na fatura final ao aderir a este tipo de programa, de acordo com a redução de carga que consegue ao longo do mês [34]. No caso do programa DLC os operadores da rede podem desligar o equipamento do consumidor por um determinado intervalo de tempo, sendo os equipamentos típicos utilizados neste programa o ar condicionado ou aquecedores de água. O programa *interruptible load* é similar ao DLC, no entanto o operador da rede não tem poder de deslastre

do equipamento. Apenas requisita ao consumidor que diminua a sua carga, sendo que se o consumidor não atender ao pedido poderá sofrer penalizações. Os programas de *demand bidding* funcionam como um mercado onde os operadores compram redução de carga ao consumidor. Efetuado o acordo, o consumidor deverá reduzir a sua carga nos termos acordados, podendo sofrer penalização por não cumprir. No caso dos programas EDRP, quem aderir compromete-se a reduzir a sua carga em condições que o operador considere de emergência. Relativamente ao programa CAP destina-se a consumidores que se comprometam a reduzir valores de carga pré-especificados aquando da ocorrência de contingências. Os participantes neste programa recebem, normalmente, uma notificação no dia anterior. Por fim, o programa A/S permite aos operadores da rede ter consumidores que ficam em reserva para qualquer eventualidade. Perante uma ocorrência o consumidor reduzirá a sua carga de acordo com o contrato.

Os programas do tipo *time-based*, baseiam-se em preços dinâmicos. O preço nesta situação flutua ao longo do dia seguindo os custos da eletricidade em tempo real. O programa TOU define o preço para determinados intervalos no dia, refletindo o custo da eletricidade para os diferentes intervalos de tempo. Exemplo disso são os preços diferentes para as horas de pico e fora do pico de consumo. O programa CPP aplica um preço da eletricidade elevado nas horas de pico de consumo, podendo ser associado a programas como o TOU ou a um programa de preço fixo ao longo do dia. Este programa é aplicado em momentos de contingência ou em horas de pico de consumo, sendo que é aplicado por um número limitado de dias ou horas num ano. Finalmente, o RTP é um programa em que preço reflete o custo da eletricidade de hora em hora, sendo dada essa informação ao consumidor, por exemplo, com um dia de antecipação.

2.3. Integração do Veículo Elétrico

Atualmente, de acordo com [35], o setor do transporte representa cerca de ¼ do total das emissões de dióxido de carbono na Europa. Neste sentido, seguindo a política de redução de gases nocivos à atmosfera, pretende-se revolucionar o setor do transporte substituindo os motores de combustão interna

pelos motores elétricos. De acordo com [36], a União Europeia pretende eliminar os veículos convencionais até 2030. Os próprios países da Europa delinearam metas para os veículos elétricos. Exemplo disso é a França que pretende ter 2 milhões de veículos elétricos em 2020 [35]. A Alemanha também tem sua meta para 2020, no entanto o objetivo é mais modesto, apenas 1 milhão de veículos elétricos. Em Portugal, de acordo com [37], pretende-se reduzir o consumo de energia em 20% até 2020 apostando-se, entre outros, em veículos elétricos e redes inteligentes. Fora da Europa também existem metas para os veículos elétricos. Nos Estados Unidos foi proposta a meta de 1 milhão de veículos elétricos até 2020 [38].

Vários projetos já foram implementados por forma a estudar qual a melhor forma de integrar os veículos elétricos. De acordo com [35], em Roterdão projetaram-se autocarros híbridos em larga escala, em Estocolmo introduziram-se carrinhas de transporte híbridas, na Dinamarca criaram-se veículos elétricos para distâncias curtas, entre outros.

Pelo descrito anteriormente pode-se concluir que diversos países começam a aderir aos veículos elétricos atendendo às vantagens ambientais e económicas.

No entanto ainda existem barreiras à sua implementação. Em [35], o preço elevado, a baixa autonomia em relação aos carros convencionais e a existência de poucos pontos de reabastecimento são apontados como barreiras à ampla integração dos veículos elétricos. Para além dos problemas mencionados, também existe o problema do acréscimo de consumo que estes veículos representam para a rede de energia elétrica.

A generalização da utilização do veículo elétrico poderá vir a trazer problemas de requisito de geração pois numa altura em que se fala em *Smart Grid* e *demand response* com o objetivo de reduzir o consumo e racionalizar a geração, o veículo elétrico aparece como uma carga extra face às existentes até agora. O veículo elétrico poderá ter um grande impacte na rede de energia elétrica sobretudo se não houver controlo sobre as horas de carregamento das

baterias [39]. No entanto, de acordo com [40] existe a crença que esse impacte não será excessivo para a rede, visto que, se considera que os carregamentos irão apenas acontecer fora das horas de pico e que o número de veículo elétricos irá aumentar lentamente. No entanto, esta visão despreza o facto de os consumidores tenderem a carregar os veículos elétricos quando lhes convém e não quando convém às entidades responsáveis pela rede elétrica.

Segundo [39], os impactes resultantes da ampla utilização dos veículos elétricos podem ser classificados em impactos na geração, transporte, distribuição e consumo.

Ao nível da geração os possíveis problemas resultam do aumento do consumo nas horas de pico e consequente construção de infraestruturas apenas para esses momentos, como centrais e sistemas de armazenamento. Também existe a preocupação com o aumento dos preços da eletricidade nas horas de pico de consumo e com o aumento das emissões de dióxido de carbono. No transporte de energia, existe a preocupação com congestionamentos das linhas devido ao aumento de potência a transportar, bem como a preocupação com a possibilidade de sobrecarga dos transformadores das subestações. Na distribuição, existe a possibilidade de haver constrangimentos locais, como a sobrecarga dos postos de transformação e das linhas de distribuição além de problemas com harmónicas. Por fim, ao nível do consumidor existe o risco da necessidade do aumento da potência contratada, possibilidade de aumento dos preços da eletricidade ou contingências na rede de energia elétrica que provoquem avarias em equipamentos. Transversal a todas estas áreas, estão os custos associados a reforços das infraestruturas, como investimentos em postos de transformação, subestações e linhas de transporte de energia de maior capacidade.

Quanto ao impacte ao nível dos gases nocivos à atmosfera, os veículos elétricos apesar de reduzirem as emissões de dióxido de carbono ao nível do transporte, aumentam as emissões de dióxido de carbono das centrais de produção de energia elétrica, devido ao consumo de energia para carregar as baterias. Portanto, para uma total eficácia na redução de emissões de dióxido de

carbono deve-se apostar numa rede com elevado número de fontes renováveis de energia [38].

2.4. Conclusões

Com a crescente necessidade de um fornecimento de energia elétrica mais fiável e de maior qualidade e com a crescente preocupação ambiental relativamente aos gases de efeito de estufa, a *Smart Grid* apresenta-se como um conceito para desenvolver e integrar novas tecnologias e tipos de produção de energia elétrica na rede de energia elétrica tradicional de forma a satisfazer essas necessidades.

Com a integração de novas tecnologias e da comunicação bidirecional promove-se o desenvolvimento de serviços em várias áreas, sendo o DSM uma delas. Com o desenvolvimento do DSM surge uma oportunidade para aumentar a eficiência energética e desenvolver estratégias para otimizar a rede de energia elétrica, como os programas de DR. Com estes programas é possível influenciar o consumidor a consumir de um modo que otimize a rede.

A integração do veículo elétrico na rede de energia elétrica é também uma forma de reduzir os gases de efeito de estufa além de representar uma forma de armazenamento de energia elétrica, isto é, quando a rede de energia elétrica tem excesso de produção de energia elétrica, os veículos elétricos podem contribuir para aproveitar essa energia elétrica. No entanto, a integração do veículo elétrico também poderá contribuir para o aumento da potência de pico.

Capítulo 3

Demand Response

Resumo

Neste capítulo apresentam-se as características e os motivos que levaram à conceção do modelo DR. Apresenta-se a metodologia utilizada para a elaboração de um modelo DR, bem como as técnicas e *software* envolvidos na sua realização. Por fim apresenta-se um exemplo de um modelo DR bem como as conclusões do capítulo.

3.1. Introdução

Neste capítulo é dada ênfase à gestão do consumo das cargas do consumidor mediante informações provindas da rede de energia elétrica.

Em primeiro lugar, é explicado em que contexto se pretende que o modelo DR funcione, bem como alguns dos impactes possíveis que este venha a ter. Também é apresentado, de uma forma geral, o funcionamento pretendido para o modelo DR. Depois são apresentadas as técnicas e *software* utilizados e a sua contribuição no processo de realização do modelo DR.

Para a realização do modelo DR, foi elaborada uma metodologia com o objetivo de ser uma plataforma que possibilitasse criar modelos DR adaptados às necessidades de cada consumidor. Definiram-se as etapas para a realização de um modelo DR e é explicado em quais das etapas se deve ter em conta as necessidades do consumidor, para que o modelo seja mais eficaz.

Por fim, é dado um exemplo da elaboração de um modelo DR a partir da metodologia referida anteriormente. O modelo é elaborado tendo como base um estudo onde são apresentados os consumos típicos de uma casa e sua percentagem de consumo em relação ao total da energia elétrica consumida. Com este estudo selecionaram-se as cargas a serem controladas pelo modelo DR. Todo o processo é apresentado por etapas de modo a fazer-se facilmente a correspondência entre a metodologia e o modelo elaborado.

Por fim, são apresentadas as conclusões de todo o capítulo.

3.2. Características da Produção e do Consumo

A evolução da rede de energia elétrica no contexto apresentado no capítulo 2 terá consequências nas rotinas do consumidor visto que este terá de gerir a potência por si utilizada de uma forma diferente da que faz hoje em dia. Assim, o consumidor para melhor se adaptar a este novo contexto passará a ter

um comportamento DR, em que vai adaptando o consumo das suas cargas às condições da rede de energia elétrica.

Com a variação do valor da potência disponível e do preço da eletricidade, o consumidor poderá ser influenciado a alterar o horário de funcionamento de algumas cargas, quer devido a uma diminuição da potência disponível, tais como uma falha de um gerador ou outras contingências, ou devido ao elevado preço da eletricidade. No entanto, também se promovem benefícios. Por exemplo, ao nível da eficiência energética ou na redução de custos com centrais destinadas a cobrir os picos de consumo, que em último caso podem fazer diminuir o preço da eletricidade pago pelo consumidor. Sintetizando, pretende-se passar de uma curva de geração desnivelada, como a atual, em que a diferença entre valor do pico de consumo e o valor do mínimo de consumo é grande, para uma que seja o mais uniforme possível, em que essa diferença não seja tão acentuada, de acordo com o apresentado na Figura 3.1. Na Figura 3.1, a curva correspondente à curva de geração desnivelada corresponde à Potência de geração 1 e a Potência de geração 2 corresponde a uma curva de geração que se pretende mais uniforme que a anterior.

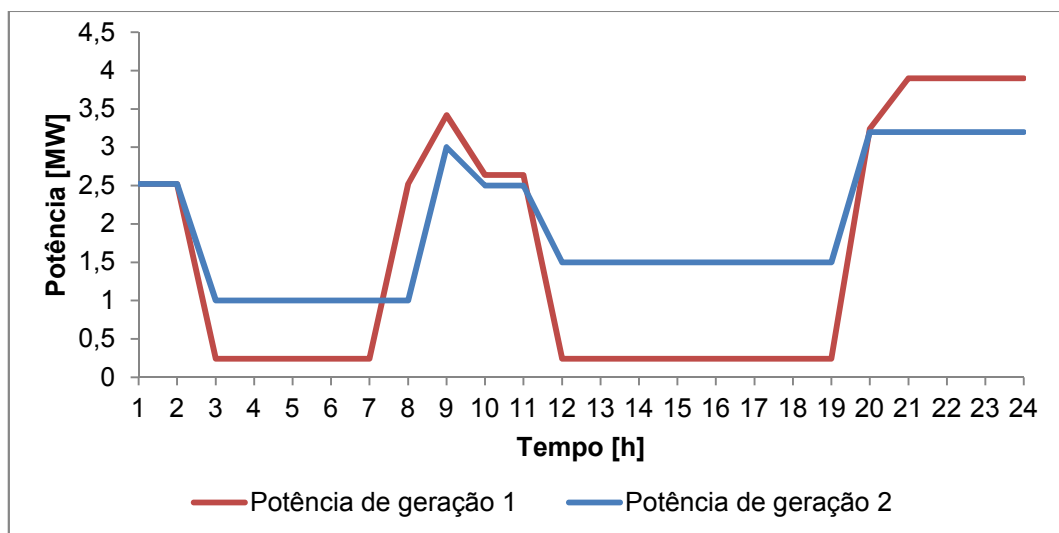



Figura 3.1 – Diagrama de geração.

O facto de cada vez se apostar mais em energia elétrica gerada a partir de fontes renováveis, que se caracterizam por uma geração intermitente e que apenas dependem da natureza e não da decisão humana, também leva a que se

tenha de lidar com o facto de a potência presente na rede de energia elétrica oscile ao longo do dia e portanto que o consumidor consiga lidar com essa intermitência e oscilação. O facto de a energia ser intermitente significa que poderá não existir energia elétrica suficiente para satisfazer a potência requerida pelo consumidor, obrigando-o a tomar opções, gerindo a potência requerida pelas suas cargas.

Idealizou-se um modelo que se pretende que seja uma ferramenta que auxilie o consumidor na gestão da utilização das suas cargas, tendo em consideração o preço da eletricidade e a potência disponível, de acordo com a sua flexibilidade e necessidades.

O modelo DR indicará o estado das cargas controláveis. Considera-se neste trabalho como carga controlável aquela que o consumidor pretende racionalizar o seu uso, podendo ser ligada se estiver no estado disponível ou desligada se estiver no estado indisponível. O modelo DR pretende representar um programa de DR do tipo *time-based*, mais concretamente um programa RTP. De acordo com o descrito no capítulo 2.2, um programa RTP permite que o consumidor pague o valor real da eletricidade bem como permite ao produtor refletir no preço o custo real da energia elétrica, evitando-se assim estimativas de preço da eletricidade que tanto podem prejudicar o produtor como o consumidor. Neste modelo não se optou por programas do tipo *incentive-based*, pois, tal como descrito no capítulo 2.2, referem-se a programas destinados a reduções de carga em casos de contingência na rede. Uma vez que neste modelo se assume que os operadores da rede são capazes de realizar um despacho ao nível residencial, limitando o nível de potência que o consumidor pode utilizar, este modelo poderá ser uma forma de reduzir a potência perante contingências na rede. Esta opção traz benefícios aos consumidores caso tenha uma ampla aderência, pois em caso de contingência o operador pode facilmente distribuir a potência a reduzir por um grande número de residências, tendo cada residência um baixo grau de redução da potência disponível.

Neste modelo DR são definidas as cargas controláveis, bem como a ordem de preferência. Assim que a soma das potências dos equipamentos

perfaça o total da potência disponibilizada, mais nenhum equipamento pode estar no estado disponível. O operador da rede apenas interfere na potência disponibilizada, deixando ao consumidor a liberdade de escolher o melhor método para gerir essa potência. Este trabalho integra-se portanto nessa gestão da potência. A Figura 3.2 apresenta a forma como se pretende que informação flua entre a rede de energia elétrica e as residências.

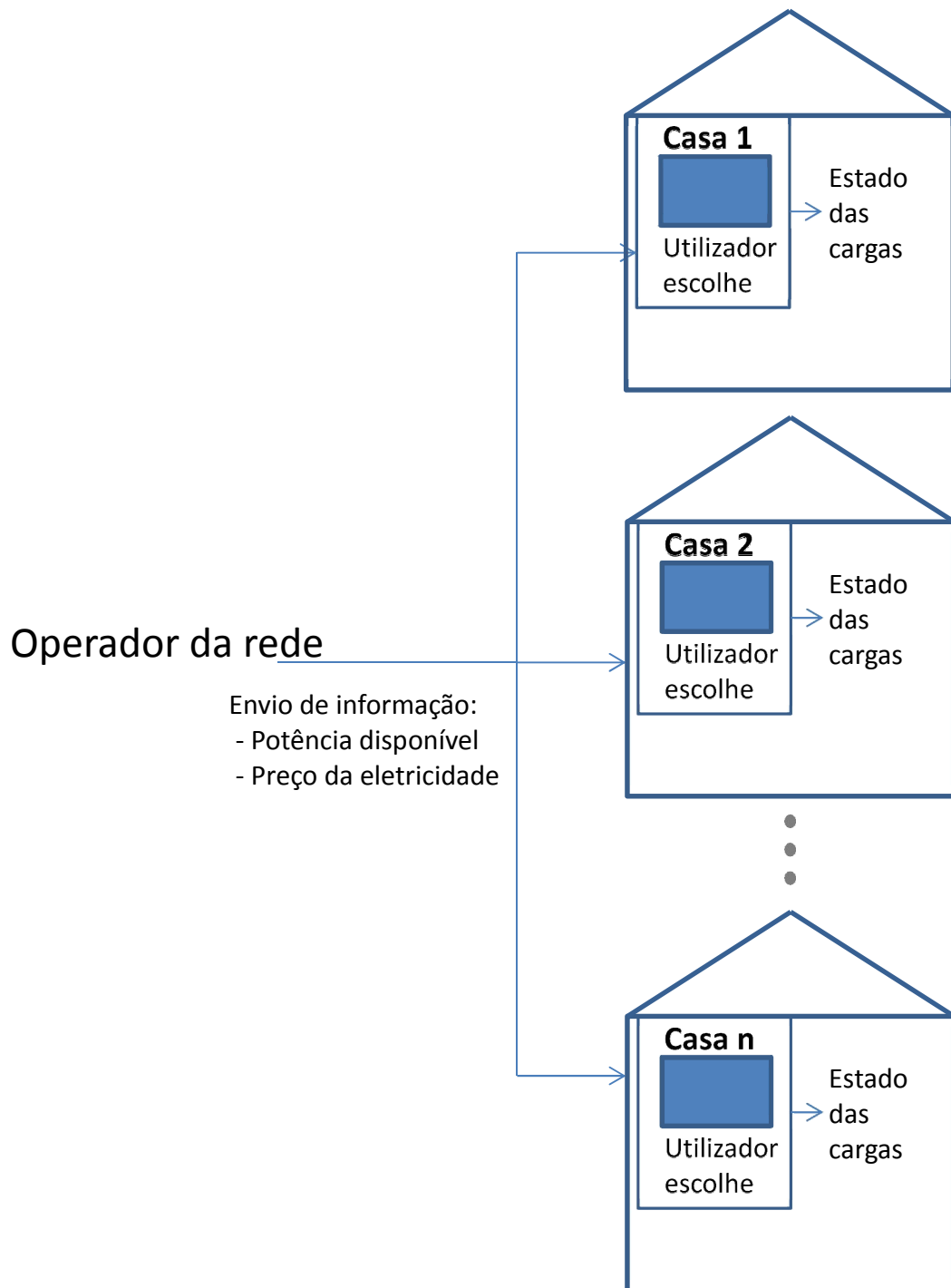



Figura 3.2 – Representação do fluxo de informação.

De forma a auxiliar o consumidor a lidar com a variação do preço ao longo do dia são definidos perfis. A cada perfil está associado um intervalo de preço a partir do qual as cargas controláveis não estão disponíveis. Assim garante-se que o consumidor apenas consome a potência disponível para as cargas controláveis quando o preço é adequado para si. Por exemplo, considere-se um consumidor

que pretende colocar as suas cargas controláveis a funcionar nas horas em que está fora de casa ou a dormir, tendo escolhido um perfil em que apenas se admite preços de eletricidade reduzidos de forma a aproveitar as horas de menor preço. O que poderá acontecer é que o preço da eletricidade poderá não baixar o suficiente para que essas cargas possam funcionar. Estando o mesmo consumidor em casa e acordado e tendo as cargas controláveis não funcionado de acordo com o que pretendia, o consumidor poderá, se assim o entender, alterar o perfil atual para um perfil que lhe permita a utilização da potência disponível a um preço mais elevado, ou então continuar à espera de um preço menor porque tem essa flexibilidade.

Relativamente à potência, o modelo pretende auxiliar o consumidor através da disponibilização de modos associados a cada perfil. A cada modo estará associado uma lista de prioridades de cargas controláveis, fazendo com que o consumidor possa alterar a prioridade das suas cargas controláveis como lhe convém, promovendo a flexibilidade na gestão do consumo da potência disponível.

Em suma, pretende-se que o modelo auxilie o consumidor a ajustar o seu consumo de acordo com o preço da eletricidade e com a potência disponível fornecidos pela rede de energia elétrica. A flexibilidade de utilização das cargas controláveis por parte do consumidor está diretamente relacionada com o preço da eletricidade e a flexibilidade de gestão do consumo da potência disponível proporcionada pelo modelo está diretamente relacionada com os modos.

Para a realização do modelo idealizado padronizou-se o comportamento DR pretendido em vários perfis e modos. Uma vez que o objetivo consiste na implementação desse comportamento DR num controlador, então procurou-se uma ferramenta que fosse capaz de reconhecer esse comportamento DR através de um conjunto de dados e o implementasse num controlador. Concluiu-se que uma das formas de o fazer seria utilizando sistemas inteligentes, recorrendo neste caso à lógica *fuzzy*. A lógica *fuzzy*, responsável pelo controlo, aliada a uma técnica de *clustering*, responsável por encontrar os padrões criados, foram as ferramentas básicas utilizadas para a realização do modelo.

3.3. *Software*

Foram utilizados os *software* MATLab®/ SIMULINK® e PSS/E®, cujas funcionalidades utilizadas no desenvolvimento deste trabalho se apresentam seguidamente.

O *software* MATLab® permite elaborar operações matemáticas, bem como a elaboração de simuladores. Com este *software* também é possível interligar várias funcionalidades do próprio *software* a partir de programação. Tem incorporado uma plataforma de simulação, o SIMULINK®, e diversas *toolbox*. Estas *toolbox* são pequenas aplicações já incorporadas no MATLab® que permitem a realização de várias operações. De entre as várias *toolbox* encontra-se a *fuzzy logic* que permite a realização de um controlador *fuzzy*, de forma simples e rápida. Relativamente à plataforma de simulação SIMULINK®, neste trabalho, foi utilizada para simular o controlador *fuzzy* criado. Por fim, a partir da criação de ficheiros, incorporados no próprio MATLab, programou-se a interação entre a *toolbox*, a plataforma de simulação e os ficheiros com os dados das entradas automatizando assim os processos para simular cenários de forma mais rápida e simples.

O *software* PSS/E®, permite a avaliação de uma rede de energia elétrica quanto à sua eficácia e segurança. É um programa que permite a elaboração de vários relatórios relativos ao estado da rede para diferentes cargas e geração. Teve como função garantir que, com a alteração das cargas em função da previsão da geração a rede se mantenha estável e segura, cumprido o objetivo de assegurar uma alimentação de qualidade e com fiabilidade às cargas. Em conjunto com o PSS/E®, utilizou-se a linguagem PYTHON® através de uma consola. Com isto, conseguiu-se automatizar as simulações no PSS/E®, que de outra forma, através da interface do próprio programa, seriam mais lentas. Através deste método, consegue-se realizar todo o tipo de tarefa que se conseguiria através da interface, desde a emissão de relatórios de estado até à alteração de especificidades técnicas de cada equipamento presente na rede a

simular. A utilização desta linguagem é facilitada pelas bibliotecas incorporadas no PSS/E® que permitem aceder a funções já construídas para este tipo de linguagem e portanto permitem o fácil acesso aos comandos deste *software*.

3.4. Metodologia

Para a realização de um modelo DR que auxilie o consumidor num contexto onde o preço da eletricidade e da potência disponível são variáveis, elaborou-se uma metodologia que serve de base à criação dos controladores *fuzzy* que controlaram os estados das cargas controláveis de acordo com as opções de perfil e modo do consumidor e com as informações recebidas da rede.

A metodologia foi criada para que facilmente se pudesse realizar e ajustar os controladores *fuzzy* às necessidades do consumidor. A metodologia é composta por 9 etapas. De seguida explica-se o objetivo de cada etapa e na Figura 3.3 apresenta-se um fluxograma da metodologia.

Na primeira etapa da metodologia definem-se os parâmetros de entrada e saída, em que esses parâmetros são as cargas que o consumidor pretende controlar ou gerir e as informações provindas da rede, tais como o preço da eletricidade e a potência disponível para o consumidor.

Definidos os parâmetros de entrada e saída, a segunda etapa destina-se a elaborar o comportamento DR que se pretende. Nesta etapa define-se a relação entre os parâmetros de entrada e de saída através de perfis e modos. Exemplo disto é a determinação das cargas a utilizar quando existe apenas determinada potência disponível ou de acordo com determinado preço da eletricidade. Define-se nesta etapa a posição de cada carga controlável na hierarquia das prioridades para cada modo e os intervalos de preço da eletricidade de cada perfil.

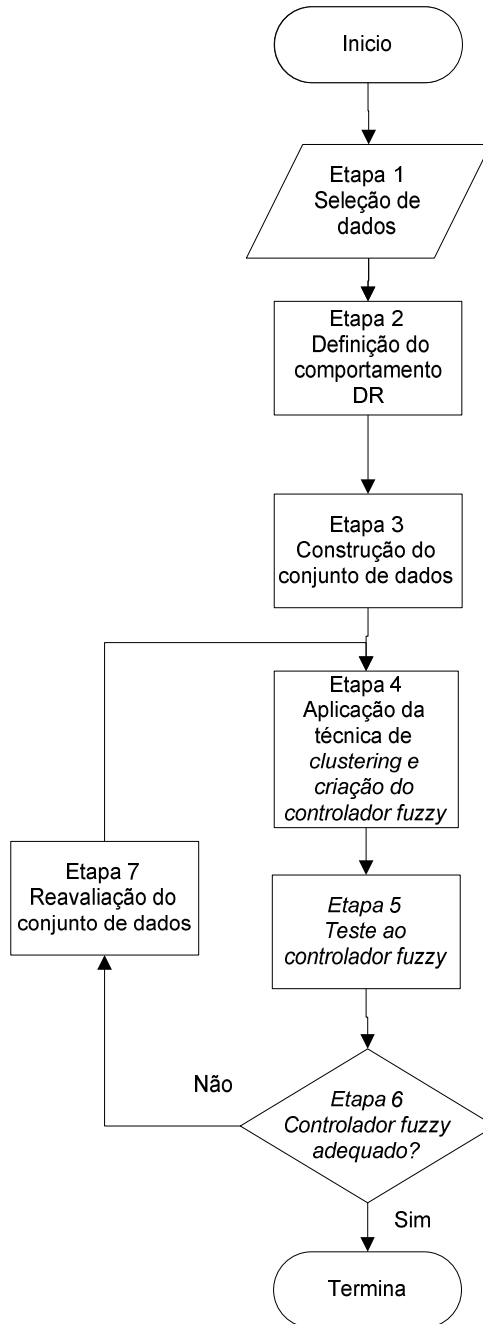



Figura 3.3 – Fluxograma da metodologia.

Na terceira etapa constrói-se o conjunto de dados, com base no comportamento DR definido na etapa anterior. Este conjunto de dados corresponde à transformação do comportamento DR em matriz numérica, ou seja, consiste na elaboração de uma matriz onde são dados pesos a cada entrada e saída consoante esse comportamento. Na quarta etapa submete-se esse conjunto de dados a uma técnica de *clustering*. Pretende-se com esta etapa a

padronização do comportamento DR espelhado no conjunto de dados e representá-lo por pontos de informação. Estes pontos de informação são as regras necessárias para implementar o comportamento DR nos controladores *fuzzy*. Com os pontos de informação obtidos, elaboram-se controladores *fuzzy* para cada relação entre perfil e modo, que permitem representar o comportamento DR através das suas entradas e saídas. Na quinta etapa testa-se a eficácia dos controladores *fuzzy* de forma a que estes garantam uma relação entre as suas entradas e saídas, representativa do comportamento DR pretendido. Na sexta etapa analisam-se os resultados dos testes e consoante esses resultados ou é concluída a construção dos controladores *fuzzy* porque estes são adequados ao pretendido ou segue-se para a sétima etapa onde se reavalia o conjunto de dados e se retorna à quarta etapa, aplicando de novo uma técnica de *clustering*.

Tabela 3.1 – Síntese da metodologia

Etapa	Ação correspondente
1	Definição dos parâmetros de entrada e saída;
2	Definição do comportamento DR;
3	Construção dos conjuntos de dados para cada relação entre perfil e modo;
4	Aplicação de uma técnica de *clustering* aos conjuntos de dados e criação do controlador *fuzzy*;
5	Testar o controlador *fuzzy*
6	Analisar os resultados dos testes e decidir se o controlador *fuzzy* é adequado. Caso a análise seja positiva, termina. Caso a análise seja negativa, passar à etapa 7.
7	Rever o conjunto de dados e voltar à etapa 4.

3.5. Controlo *Fuzzy*

Tal como descrito anteriormente, o modelo DR utiliza sistemas inteligentes, nomeadamente controladores *fuzzy*. Este tipo de sistema inteligente,

de acordo com a IEC1131-7 é a aplicação da teoria da lógica *fuzzy* ao controlo de sistemas.

Uma vez que a realização do controlo *fuzzy* exige a elaboração de regras e visto que para a realização do controlo pretendido seriam necessárias muitas regras em função das várias entradas e saídas, recorreu-se a técnicas de *data clustering*, assim denominadas na literatura. Além disso, uma vez que o comportamento DR é baseado em padrões de consumo, estas técnicas permitem a identificação de padrões em conjuntos de dados.

Segundo [41], *data clustering* é um processo que permite agrupar informação similar contida num conjunto de dados. Os grupos construídos são representados por pontos de informação denominados *cluster centers*. O objetivo é que a similaridade entre os pontos de informação de um grupo representados por um *cluster center* seja maior que entre os pontos de informação representados por *cluster centers* diferentes. Neste trabalho o conjunto de dados será constituído por pontos de informação que representam o comportamento DR. Um ponto de informação é constituído por variáveis de entrada e saída. Por exemplo, se os parâmetros de entrada forem os estados de A, B, C e os parâmetros de saída forem os estados de D e E, então um ponto de informação será constituído por (A, B,C,D,E) sendo que no lugar das letras estará o valor do peso dado a cada uma das variáveis de entrada e saída.

Ainda de acordo com [41], os algoritmos de *clustering* podem ser do tipo *on-line* ou *off-line*, sendo que os do tipo *on-line* são um processo em que cada vetor de entrada, representativo do ponto de informação, é utilizado para atualizar os *cluster centers*. Neste caso, o sistema calcula os *cluster centers* à medida que mais vetores são introduzidos. Por outro lado, os algoritmos do tipo *off-line,* baseiam-se num dado conjunto de dados fornecidos e encontram os *cluster centers* desse conjunto fixando-os e classificando os novos vetores de entrada de acordo com os *clusters centres* existentes. Neste trabalho, optou-se pelo método *off-line* visto que se pretende construir um controlo que ajuste as condições de entrada aos parâmetros definidos e não que este se vá adaptando aos valores de

entrada, uma vez que o objetivo é padronizar um comportamento DR e que o controlador *fuzzy* funcione sempre de acordo com esse comportamento.

Associado aos algoritmos de *clustering* do tipo *off-line* existem várias técnicas de *data clustering*, entre quais se inclui *Fuzzy K-means clustering*, *Fuzzy C-means clustering*, *Mountain clustering* e *Subtractive clustering*.

Uma vez que as técnicas *Fuzzy K-means clustering* e *Fuzzy C-means clustering* necessitam previamente da informação do número de *cluster centers* a criar e dado que o controlador *fuzzy* pretendido teria múltiplas entradas e saídas então concluiu-se que estas técnicas não eram as mais apropriadas para este trabalho, porque seria difícil de prever quantos *cluster centers* seriam necessários. Outra razão é o facto do controlo pretendido não ter restrição quanto ao número de regras, desde que resultasse um tempo de processamento adequado. Por conseguinte, foram analisadas as técnicas *mountain clustering* e *subtractive clustering* uma vez que não necessitam previamente da informação sobre número de *clusters*, tendo a escolha recaído na técnica *subtractive* clustering.

A técnica *subtractive clustering* foi formulada por Chiu e publicada em [42]. É baseada na técnica *mountain clustering* [43], apresentada no apêndice 1, sendo que a grande diferença reside no método de cálculo dos *cluster centers*. Enquanto na técnica *mountain clustering* o cálculo é feito para todas as intersecções de todas as redes criadas, na técnica *subtractive clustering* assume-se que cada ponto de informação é um possível *cluster center*. Esta diferença tem implicação no tempo de computação, visto que uma depende da quantidade de dados de entrada e do número de redes criadas enquanto a outra apenas depende da quantidade de dados de entrada.

A técnica *subtractive clustering*, baseia-se num conjunto de dados que posteriormente são avaliados por uma função denominada função montanha. Após esta avaliação são analisados os *cluster centers* obtidos para determinar se são válidos ou não. Graficamente esta metodologia pode ser observada nas Figura 3.4 e Figura 3.5. No final são criadas as regras para o controlador *fuzzy*

através dos *cluster centers* obtidos. Seguidamente é apresentada uma descrição desta técnica.

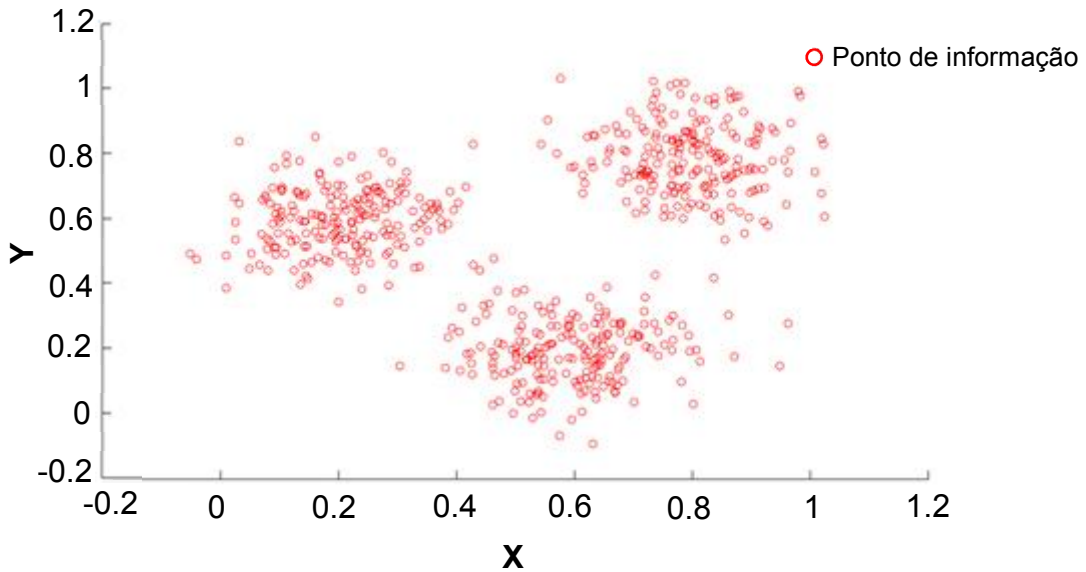



Figura 3.4 – Gráfico com conjunto de dados antes da avaliação da função montanha.

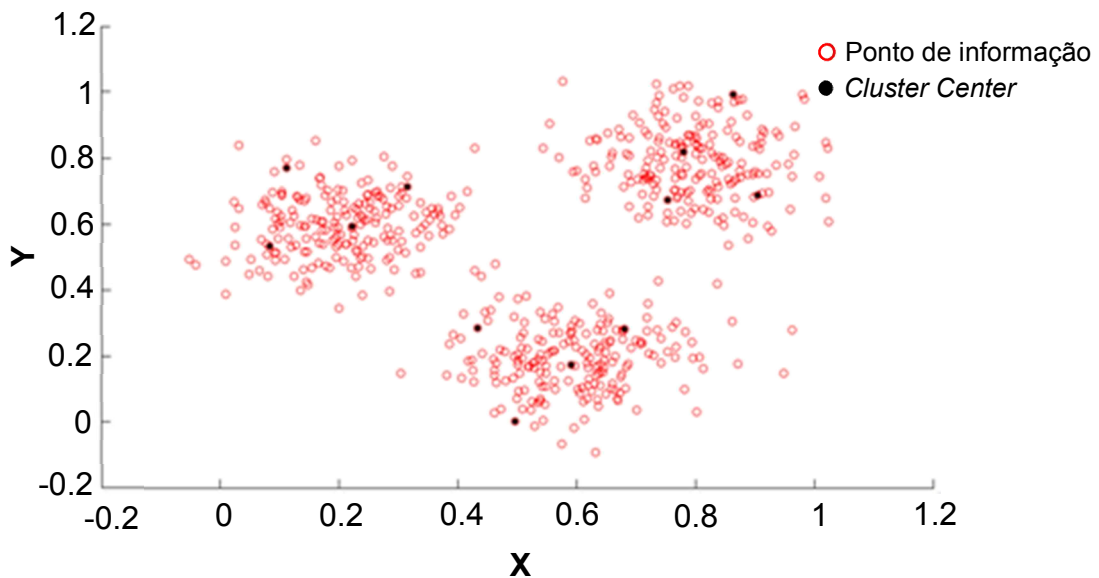



Figura 3.5 - Representação dos *cluster centers* após avaliação da função montanha.

A função montanha avalia a possibilidade de cada ponto de informação ser um *cluster center* através do cálculo da densidade de pontos à sua volta de acordo com a equação (3.1).

$$P_i = \sum_{j=1}^{n} \mathrm{e}^{-\alpha\|x_i - x_j\|^2} \qquad \textbf{(3.1)}$$

Onde x_i representa o i-enésimo ponto de informação, P_i representa o seu potencial para ser um *cluster center*, *n* representa o número de pontos de informação, x_j representa o *j*-enésimo ponto de informação vizinho de x_i e α é dado pela equação (3.2).

$$\alpha = \frac{4}{r_a^2} \qquad \textbf{(3.2)}$$

Onde r_a é uma constante positiva que representa o raio que define até que distância é que um ponto de informação é considerado vizinho. De acordo com a equação (3.1), um ponto de informação que tenha muitos pontos vizinhos terá um valor potencial maior. Este parâmetro tem influência direta no número de regras criadas. Quanto maior o valor de r_a, menos *cluster centers* serão definidos e o inverso ocorre quanto menor for este parâmetro.

Após este processo ser efetuado para todos os pontos de informação do conjunto de dados, seleciona-se o ponto de informação com o maior valor potencial de ser *cluster center*. Assumindo que x_1^* é a localização desse *cluster center* e P_1^* o seu valor potencial, pode-se analisar de novo os valores potenciais de cada ponto de informação x_i através da equação (3.3).

$$P_i \Leftarrow P_i - P_1^* e^{-\beta\|x_i - x_1^*\|^2} \qquad \textbf{(3.3)}$$

Onde β é dado pela equação (3.4).

$$\beta = \frac{4}{r_b^2} \qquad \textbf{(3.4)}$$

Onde r_b é uma constante positiva cujo valor ditará até que distância é que um ponto de informação sofrerá a redução do valor potencial de ser um *cluster center*. Assim, através da equação (3.3) subtrai-se uma quantidade do potencial de cada ponto de informação em função da sua distância do *cluster center* x_1^*. Os pontos de informação perto desse *cluster center* ficaram com o seu valor potencial de ser um *cluster center* reduzido e por isso é pouco provável que

sejam selecionados como o próximo *cluster center*. Esta medida evita que se criem *cluster centers* similares. Para evitar obter *cluster centers* muito similares é recomendado utilizar um valor de r_b maior que o de r_a. Em [42], recomenda-se um valor de r_b 1.5 vezes maior do que r_a. Neste trabalho, o valor de r_b está de acordo com o definido na função genfis2, incorporada no MATLab®, ou seja $1.5r_a$.

Após a reavaliação de todos os pontos de acordo com a equação (3.3), seleciona-se o ponto de informação com maior potencial restante como o segundo *cluster center*. De seguida, reduz-se o potencial de cada ponto de informação de acordo com a sua distância ao segundo *cluster center*. Genericamente, depois do *k*-enésimo *cluster center* ter sido escolhido, reavalia-se o potencial de cada ponto de informação pela equação (3.5).

$$P_i \Leftarrow P_i - P_k^* e^{-\beta \left\| x_i - x_k^* \right\|^2} \quad \textbf{(3.5)}$$

Onde x_k^* é a localização do *k*-enésimo *cluster center* e P_k^* é o seu valor potencial de ser um *cluster center*.

Neste método, a forma de aceitar ou rejeitar o *cluster center* é feita de acordo com o seguinte algoritmo:

If $P_k^* > \bar{\varepsilon} P_1^*$

Aceitar x_k^* como *cluster center* e continuar

else if $P_k^* < \underline{\varepsilon} P_1^*$

Rejeitar x_k^* e terminar o processo de *clustering*

else

Deixar d_{min} ser igual à mais pequena distância entre o ponto x_k^* e os outros *cluster centers* encontrados

If $\frac{d_{min}}{r_a} + \frac{P_k^*}{P_1^*} \geq 1$

Aceitar x_k^* como um *cluster center* e continuar o processo

else

Rejeitar x_k^* e atribuir o seu valor potencial 0

Selecionar o ponto de informação com o próximo maior valor potencial como o novo x_k^* e testá-lo

end if

end if

Neste processo, importa referir que $\bar{\varepsilon}$ representa o potencial a partir do qual se aceita definitivamente o ponto de informação como *cluster center*. Enquanto $\underline{\varepsilon}$ representa o potencial abaixo do qual se rejeita definitivamente o ponto de informação. Os valores de $\bar{\varepsilon}$ e $\underline{\varepsilon}$ são 0.5 e 0.15, respetivamente. Quanto ao d_{min} é igual à mais pequena distância entre o ponto x_k^* e os outros *cluster centers* encontrados. De acordo [42], se o potencial cair no meio desse intervalo, deve ser encontrado um compromisso entre um valor de potencial suficiente para ser *cluster center* e estar suficiente longe de um *cluster center*.

Como cada *cluster center* representa uma característica comportamental do sistema, então pode ser utilizado na formulação das regras necessárias para o controlo *fuzzy*. A formulação das regras através destes *cluster centers* é apresentada seguidamente.

Considerando os seguintes *cluster centers* $\{x_1^*, x_2^*, \ldots, x_c^*\}$, onde x_c^* representa o *c*-enésimo *cluster center*, num espaço de dimensão M, assumindo

que as primeiras N dimensões correspondem a variáveis de entrada e as últimas dimensões, M-N, correspondem às variáveis de saída. Decompõe-se cada vetor x_i^* em dois vetores componentes y_i^* e z_i^*, onde y_i^* contém os primeiros N elementos de x_i^*, neste caso as coordenadas do *cluster center* para as variáveis de entrada. z_i^* contém as coordenadas dos elementos M-N, neste caso as coordenadas para as variáveis de saída.

Como referido anteriormente, considera-se cada *cluster center* x_i^* como uma das regras para o controlo *fuzzy* que descreve o comportamento do sistema. Dado um vetor de entrada *y*, o grau para o qual a regra *i* é preenchida é definida pela equação (3.6).

$$\mu_i = \mathrm{e}^{-\alpha\|y-y_i^*\|^2} \tag{3.6}$$

Onde μ_i representa o grau de pertença do vetor *y* em relação à regra *i* e α é a constante definida na equação (3.2). A variável de saída *z* é calculada pela equação (3.7).

$$z = \frac{\sum_{i-1}^{c} \mu_i z_i^*}{\sum_{i-1}^{c} \mu_i} \tag{3.7}$$

Este método pode ser visto em termos de um sistema de inferência da lógica *fuzzy* implementado às tradicionais regras *if-then*. Cada regra tem a forma seguinte:

if Y_1 *é* A_1 & Y_2 *é* A_2 & …& Y_j é A_j … **then** Z_1 *é* B_1 & Z_2 *é* B_2 & …& Z_j é B_j

Onde, Y_j é a j-enésima variável de entrada e Z_j é a j-enésima variável de saída; A_j é a j-enésima função de pertença exponencial e B_j é o *j*-enésimo valor único. Para a regra *i*, que é representada pelo *cluster center* x_i^*, A_j e B_j são dados pela equação (3.8) e (3.9), respetivamente.

$$A_j(q) = \mathrm{e}^{-\alpha(q-y_{ij}^*)^2} \tag{3.8}$$

Onde *q* representa o elemento do universo de discurso ou seja o valor da abcissa das funções de pertença, y_{ij}^* é o *j*-enésimo elemento de y_i^* .

$$B_j = z_{ij}^* \tag{3.9}$$

Onde z_{ij}^* é o *j*-enésimo elemento de z_i^*.

Este algoritmo é equivalente a um método de inferência que utiliza a multiplicação como operador AND. Pesa a saída de cada regra processando o valor de saída como uma média ponderada do valor de saída de cada regra, tal como se pode observar pela equação (3.7).

As equações (3.6) e (3.7) representam uma fórmula de elaboração de regras do tipo *if-then*.

De forma a otimizar as regras, utiliza-se o método dos mínimos quadráticos recursivos. Assim, z_i^* na equação (3.7), passa a ser uma função linear das variáveis de entrada ao invés de uma constante, expresso pela equação (3.10).

$$z_i^* = G_i y + h_i \tag{3.10}$$

Onde G_i é uma matriz constante $(M - N) \times N$ e h_i é um vetor coluna constante com $M - N$ elementos. A equivalência das regras *if-then* são do tipo Takagi-Sugeno [44], onde a consequência de cada regra é uma equação linear das variáveis de entrada.

Expressar z_i^* como uma função linear das variáveis de entrada permite um grau significativo de otimização das regras a ser realizado sem adicionar muita complexidade computacional [44]. De acordo com [44], dado um conjunto de regras com premissas fixas a otimização dos parâmetros nas equações consequentes tendo em conta os dados de treino, reduz-se a um problema de mínimos quadrados recursivos.

Para converter o problema de otimização dos parâmetros da equação num problema de otimização através do método dos mínimos quadráticos recursivos, definiu-se ρ_i de acordo com a equação (3.11).

$$\rho_i = \frac{\mu_i}{\sum_{j=1}^{c} \mu_i} \tag{3.11}$$

Onde, ρ_i representa a média ponderada dos μ_i.

Assim a equação (3.7) pode ser reescrita pela equação (3.12) ou pela equação (3.13).

$$z = \sum \rho_i z_i^* = \sum_{i=1}^{c} \rho_i (G_i y + h_i) \tag{3.12}$$

$$z^T = \left[\rho_i y^T \ \rho_1 \cdots \rho_c y^T \ \rho_c\right] \begin{bmatrix} G_1^T \\ h_1^T \\ \vdots \\ G_c^T \\ h_c^T \end{bmatrix} \tag{3.13}$$

Onde z^T e y^T são vetores linha. Dado um conjunto de *n* pontos de entrada $\{y_1, y_2, \ldots, y_n\}$, o conjunto resultante das saídas será dado pela equação (3.14).

$$\begin{bmatrix} z_1^T \\ \vdots \\ z_n^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{1.1} y_1^T \ \rho_{1.1} & \cdots & \rho_{c.1} y_1^T \ \rho_{c.1} \\ & \vdots & \\ \rho_{1.n} y_n^T \ \rho_{1.n} & \cdots & \rho_{c.n} y_n^T \ \rho_{c.n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_1^T \\ h_1^T \\ \vdots \\ G_c^T \\ h_c^T \end{bmatrix} \tag{3.14}$$

Onde $\rho_{i,j}$ representa ρ_i avaliado por y_j. De notar que, dado $\{y_1, y_2, \ldots, y_n\}$, a primeira matriz do lado direito da equação (3.14) é constante, enquanto a segunda matriz contém todos os parâmetros a serem otimizados.

Recorrendo ao método dos mínimos quadráticos recursivos minimiza-se o erro quadrático entre o modelo de saída e os pontos de treino substituindo a matriz do lado esquerdo da equação (3.14) pelos valores de saída dos dados de

treino. É implícito que no problema de estimativa através do método dos mínimos quadráticos recursivos, se considere que o número dos dados de treino é maior que o número de parâmetros a ser otimizado [44].

Para resumir, método *subtractive clustering* consiste em dois passos distintos:

1. Encontrar os *cluster centers* para estabelecer o número de regras e as premissas das regras;
2. Otimizar as regras.

Embora o número de *cluster centers*, ou regras, seja automaticamente determinado por este método, deve-se notar que o parâmetro r_a , definido pelo consumidor, tem um forte efeito no número de *cluster centers* que serão gerados. Um valor elevado de r_a geralmente resulta em poucos *cluster centers* e por isso um modelo demasiado generalista, enquanto um valor baixo de r_a pode gerar um número excessivo de *cluster centers* e por isso um modelo que não apresenta uma generalização adequada. Por isso, pode-se afirmar que r_a é uma aproximação específica da resolução desejada para o modelo, que pode ser ajustada de acordo com a complexidade resultante e capacidade de generalização do modelo.

3.6. Modelo de *Demand Response*

Neste subcapítulo descreve-se um comportamento DR e elaboram-se os controladores *fuzzy* que constituem o modelo DR. Este modelo DR será constituído na sua base por modelos em SIMULINK®. A descrição do comportamento DR e dos controladores *fuzzy* será feita de acordo com a metodologia apresentada no subcapítulo 3.4. Assim, este subcapítulo é dividido em etapas, as quais correspondem à metodologia apresentada.

Etapa 1 – Seleção de dados

Os parâmetros de entrada e de saída definidos para os controladores *fuzzy* serão as cargas controláveis, o preço da eletricidade e a potência

disponível. Para a definição de cargas consideradas como controláveis foi considerado que as cargas com maior consumo de potência associado e consequentemente com mais peso na fatura de eletricidade, ou as cargas que têm um número de utilização reduzido e que têm associada flexibilidade no horário de funcionamento, são aquelas que têm maior probabilidade de serem consideradas como controláveis. Partindo deste princípio analisou-se um estudo efetuado em Portugal [45] sobre a repartição da energia elétrica pelos vários equipamentos elétricos de uma residência. A Figura 3.6 apresenta a repartição da eletricidade numa casa por uso final.

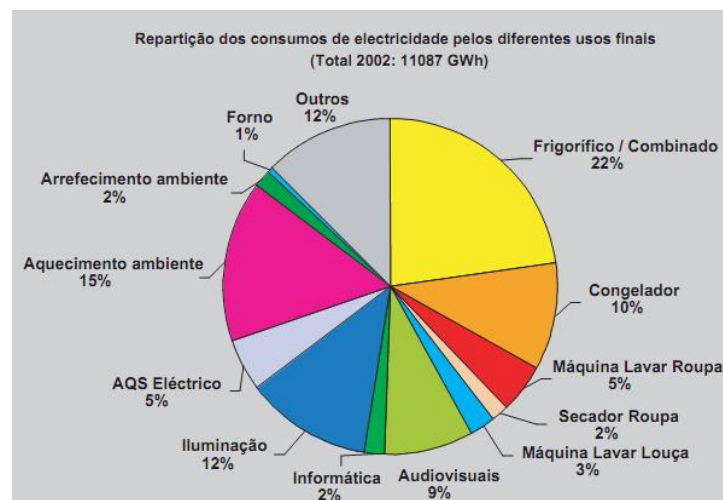



Figura 3.6 – Repartição do uso da eletricidade por uso final [45].

Como é possível verificar através da Figura 3.6, o maior consumo de eletricidade verifica-se em equipamentos de refrigeração de bens alimentares, como o frigorífico e o congelador. Este tipo de equipamento não tem uma grande probabilidade de ser considerado como carga controlável visto que se trata de manter os alimentos a uma temperatura que garanta um bom estado de conservação. A seguir, o maior consumo de eletricidade verifica-se na climatização, representando cargas como o ar condicionado ou ventiladores. Estas cargas podem ser consideradas controláveis, visto que se trata de conforto e a opção do consumidor pode ser de menor conforto em troca de um menor valor de faturação. Relativamente às categorias, iluminação, audiovisuais e informática, representam equipamentos como lâmpadas, televisões ou computadores, respetivamente. Este tipo de equipamento tem uma utilização irregular pelo que a

probabilidade de ser considerada como carga controlável é baixa. Por fim as máquinas de lavar roupa, secar roupa e lavar louça, representam um total de 10% da eletricidade consumida em casa, e sendo equipamentos com um número máximo de utilizações por dia de 2 a 3 vezes, o seu horário de funcionamento pode ser flexível de acordo com a rotina do consumidor.

Assim, neste estudo será tipificado uma residência com uma potência contratada de 6,9 kVA com as cargas controláveis apresentadas na Tabela 3.2. As potências apresentadas na Tabela 3.2 são baseadas no simulador criado pela Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, ERSE [23].

Tabela 3.2 - Cargas controláveis e respetiva potência

Cargas controláveis	Potência [kW]	Número
Ar condicionado	1,8	1
Máquina de Lavar Loica	2,0	1
Máquina de Lavar Roupa	2,0	1
Máquina de Secar Roupa	3,5	1
Termoventilador	2,0	1
Total	11,3	5

<u>Etapa 2 – Definição do comportamento DR</u>

Define-se o comportamento DR pela relação entre os parâmetros de entrada e de saída. Neste caso o comportamento DR do consumidor é a relação entre o estado das cargas controláveis e a informação provinda da rede de energia elétrica, ou seja, o preço da eletricidade e a potência disponível.

Para a implementação do comportamento DR pretendido, o consumidor recorre aos perfis e modos definidos. A cada perfil estão associados modos, ou seja, a cada intervalo de preço da eletricidade estão associados vários modos de gestão das cargas controláveis.

Para o comportamento DR pretendido foram definidos três perfis e dois modos. Os perfis são: económico, moderado e exigente. Os modos são: asseio e conforto. Com o perfil económico, o consumidor apenas poderá utilizar os equipamentos quando o valor do preço da eletricidade estiver dentro do

intervalo 1. Com o perfil moderado, os equipamentos estarão acessíveis quando o valor do preço da eletricidade estiver dentro do intervalo 2, que inclui o intervalo de preço da eletricidade do perfil económico e valores superiores. Por fim, no perfil exigente poder-se-á utilizar sempre as cargas controláveis independentemente do preço da eletricidade. Os dois modos surgem da avaliação das cargas consideradas controláveis neste estudo, agrupando-as em dois tipos: Asseio e Conforto. Esta opção foi tomada devido ao facto de, tal como apresentado na Tabela 3.2, a soma de todas as potências ser 11300 W, o que é superior à potência contratada de 6.9 kVA. Isto permite ao consumidor, por exemplo no modo asseio, dar prioridade às máquinas de lavar louça e roupa bem como à máquina de secar em vez do ar condicionado e do termoventilador, enquanto no modo conforto as prioridades são invertidas. Assumiram-se os dois modos dentro de cada perfil para dar maior grau de flexibilidade de utilização das cargas controláveis ao consumidor, permitindo que o consumidor possa utilizar a mesma hierarquia de prioridades ao preço que mais lhe convier.

A Tabela 3.3, Tabela 3.4 e Tabela 3.5, apresentam os perfis com os respetivos modos e preços associados. Estas tabelas contêm as informações necessárias para que o consumidor consiga tirar o melhor proveito do modelo, pelo que são consideradas como ferramentas para apoio na decisão do consumidor. De referir que nestas tabelas a ordem de aparência é igual à ordem de prioridades para que se possa fazer uma análise comparativa do modelo DR resultante para os diferentes cenários. Por exemplo na Tabela 3.3, no modo asseio, a máquina de lavar loiça é a carga prioritária número 1 e o termoventilador é a carga prioritária número 5.

Tabela 3.3 – Características do perfil económico

Economico		
Modo		**Preço**
Asseio	**Conforto**	
Máquina de lavar Loiça	Ar Condicionado	1
Máquina de lavar Roupa	Termoventilador	1
Máquina de Secar Roupa	Máquina de lavar Loiça	1
Ar Condicionado	Máquina de lavar Roupa	1
Termoventilador	Máquina de Secar Roupa	1

Tabela 3.4 – Características do perfil moderado

Moderado		
Modo		**Preço**
Asseio	**Conforto**	
Máquina de lavar Loiça	Ar Condicionado	2
Máquina de lavar Roupa	Termoventilador	2
Máquina de Secar Roupa	Máquina de lavar Loiça	2
Ar Condicionado	Máquina de lavar Roupa	2
Termoventilador	Máquina de Secar Roupa	2

Tabela 3.5 – Características do perfil exigente

Exigente		
Modo		**Preço**
Asseio	**Conforto**	
Máquina de lavar Loiça	Ar Condicionado	3
Máquina de lavar Roupa	Termoventilador	3
Máquina de Secar Roupa	Máquina de lavar Loiça	3
Ar Condicionado	Máquina de lavar Roupa	3
Termoventilador	Máquina de Secar Roupa	3

Ainda relativamente ao comportamento DR definiu-se que, apesar do consumidor ser sempre obrigado a seguir as prioridades definidas, este poderá optar por não utilizar algumas das prioridades. Contudo essa escolha será sempre feita por ordem decrescente respeitando a hierarquia definida. Isto é, o

consumidor para dizer que não quer ligar a prioridade 2 implica que terá de dizer que não quer ligar a prioridade 1. Isto permite que toda a potência disponível possa ser utilizada apenas pelas 3 últimas prioridades. Esta consideração foi tida em conta para que o consumidor possa ter um maior grau de liberdade na utilização da potência disponível. No presente trabalho é possível observar esta situação no apêndice 3, tabela 1, que representa os dados para o controlo *fuzzy* do perfil económico modo asseio. No apêndice 3 tabela 1, verifica-se que na situação 1 a potência é aplicada à máquina de lavar loiça e à máquina de lavar roupa não restando potência suficiente para as cargas seguintes. No entanto, na situação 2, o consumidor ao prescindir da máquina de lavar loiça, prioridade 1, essa potência deixou de ser aplicada a essa carga controlável para ser aplicada aos equipamentos seguintes: máquina de lavar roupa e máquina de secar roupa.

A potência disponível será sempre aplicada a cada equipamento de acordo com as prioridades definidas. No caso de haver potência disponível para uma carga prioritária, mas que implica que a hierarquia não é respeitada, essa potência não é utilizada. Exemplo disso é existir potência para a carga prioritária 1 e 2 e não para a 3, mas no entanto ainda haver potência disponível para a carga prioritária 4. Neste caso o estado da carga prioritária 4 é indisponível. É possível observar a aplicação desta consideração através do apêndice 3 tabela 1, pois na situação 1 as máquinas de lavar loiça e roupa estão ligadas restando ainda 2400 W. Esta potência é insuficiente para ligar a prioridade seguinte, a máquina de secar roupa, no entanto seria suficiente para ligar o ar condicionado. Contudo este não é ligado de modo a respeitar a hierarquia definida.

No caso da potência disponível não satisfazer a primeira carga prioritária, então essa potência é aplicada à carga prioritária seguinte. Com isto pretende-se evitar que o consumidor fique impossibilitado de utilizar qualquer equipamento apenas porque a potência disponível não é suficiente para a primeira carga prioritária. Através do apêndice 3 tabela 2, é possível verificar que nas situações 1, 2, 3 e 4, a potência disponível é insuficiente para a máquina de lavar loiça, máquina de lavar roupa e máquina de secar roupa, prioridades 1, 2 e 3 respetivamente, no entanto é suficiente para o ar condicionado. Então a potência

passa a estar disponível para esta carga. Na situação 5, o consumidor ao prescindir do ar condicionado não resulta em nenhum benefício pois a potência disponível não é suficiente para ligar o termoventilador, então optou-se nesta situação por disponibilizar essa energia para o ar condicionado na mesma.

Etapa 3 – Construção do conjunto de dados

Foram construídos para cada combinação de perfil e modo um conjunto de dados em Excel®, que representa o comportamento DR desejado. No conjunto de dados assumiu-se para o estado disponível o valor da potência nominal dos equipamentos e para o estado indisponível o número 0. Esta notação foi utilizada porque facilitou depois a transmissão de dados para o PSS/E para avaliar o comportamento da residência e numa rede de energia elétrica.

Uma vez que não se encontrou na literatura nenhuma informação disponível e clara sobre como poderá ser feito o despacho de potência ao nível residencial, no que diz respeito, por exemplo, à definição da precisão da informação sobre potência disponível, assumiu-se que o modelo DR recebe a informação da potência disponível com uma precisão de 100W. Esta assunção assenta em resultados de um processo experimental, no qual foi verificado que este valor conduz a resultados que indiciam uma maior robustez do modelo, uma vez que corresponde a um menor número de regras utilizadas e consequente rapidez de resposta. Sendo que a resposta do modelo nesta situação apresenta resultados coerentes e satisfatórios.

Os limites, máximo e mínimo, para o qual o modelo é válido são 6900 W e 1800 W, respetivamente. Os 6900 W proveem da potência contratada assumida de 6900 VA, tendo sido desprezada a potência reativa neste estudo. Os 1800 W representam a carga controlável de potência mais baixa.

Etapa 4 – Submeter o conjunto de dados a uma técnica de clustering e construir o controlador fuzzy

Após a geração do conjunto de dados, criou-se um ficheiro do tipo .m, função incorporada no *software* MATLab® explicado em 3.3, onde se aplica a função genfis2, responsável pela a aplicação da técnica *subtractive clustering* a

cada conjunto de dados criado na etapa 3. De seguida aplica-se a função *fuzzy* que permite articular os *cluster centers* criados em regras do tipo *if-then* e assim criar o controlador *fuzzy*, ficando esse controlo guardado num ficheiro do tipo .fis. O código do ficheiro .m está descrito no apêndice 8.

Na Tabela 3.6 apresenta-se o número de regras, e o correspondente valor de r_a utilizado, para cada controlo *fuzzy* após a realização de vários testes.

Tabela 3.6 – Regras por cada perfil e modo e o correspondente r_a

Perfil	Modo	Número de regras	r_a
Económico	Asseio	7	1.5
	Conforto	8	1.5
Moderado	Asseio	14	1.4
	Conforto	10	1.5
Exigente	Asseio	9	1.5
	Conforto	7	1.5

Etapa 5 – Testar o controlador fuzzy

Recorreu-se à plataforma de simulação SIMULINK® do Matlab® para testar os controladores *fuzzy* realizados. Foram elaborados dois modelos SIMULINK®, um para o modo asseio e outro para o modo conforto, tal como apresentado no apêndice 7. A Figura 3.7 apresenta a forma como funcionam os modelos SIMULINK®.

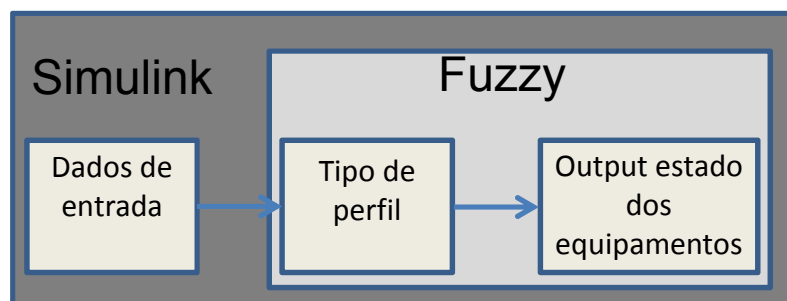



Figura 3.7 - Modelo de DR.

Os dados de entrada serão os estados dos equipamentos pretendidos pelo consumidor, a potência disponível e o preço da eletricidade, bem como o perfil e o modo desejados. Por fim, os *outputs* são os estados dos equipamentos resultantes da avaliação do controlador *fuzzy*.

Todo o processo começa com a receção dos dados de entrada e com a seleção do tipo de perfil e modo que o consumidor pretende. Depois esses dados de entrada são avaliados pelo controlador *fuzzy* tendo em conta o perfil e modo escolhidos. Por fim, do controlador *fuzzy* resulta um relatório com a informação dos estados das cargas controláveis, bem como a informação do perfil e modo em utilização ou a razão pela qual nenhuma carga está disponível. Um exemplo desse relatório pode ser visto no apêndice 4.

Para automatizar o processo de simulação, programou-se um ficheiro .m, apresentado no apêndice 9, que articula todos os controladores *fuzzy* e modelos SIMULINK, de modo a simular uma situação real, em que o consumidor escolhe o perfil, o modo e o estado pretendido para cada carga controlável. Na programação do ficheiro .m teve-se em atenção o facto de os controladores *fuzzy* não devolverem o valor exato correspondente ao estado da carga controlável, potência nominal para o estado disponível ou zero para o estado indisponível. Isto deve-se ao facto de se utilizarem poucas regras. No entanto verifica-se que quando o controlador devolve um valor superior a metade da potência nominal da carga controlável significa que essa carga controlável está disponível, por outro lado se o valor devolvido for inferior a metade da potência nominal da carga controlável significa que o estado da carga controlável é indisponível.

Etapa 6, 7 e 8

Foram analisados os resultados dos testes feitos aos controladores *fuzzy* e verificou-se que os mesmos representavam o comportamento DR desejado.

3.7. *Conclusões*

A metodologia estabelecida no subcapítulo 3.4 apresenta-se como uma ferramenta base que permite definir um comportamento DR que se pretenda. Entendeu-se que uma ferramenta baseada em padrões de consumo seria

facilmente entendível por qualquer consumidor, pois este acaba apenas por ter de optar entre um perfil e um modo dentro de um conjunto de perfis e modos disponíveis.

Os perfis e modos que se relacionam entre si podem ser os mais variados e os que o consumidor desejar. Com os perfis o consumidor estabelece os intervalos de preço da eletricidade que necessitar e com os modos pode estabelecer várias hierarquias de prioridades para as suas cargas controláveis facilitando a sua gestão no consumo da potência disponível. No modelo DR criado no subcapítulo 3.6 optou-se por utilizar os mesmos modos em todos os perfis para explicar que o consumidor mantendo o mesmo modo poderia utilizar diferentes perfis, ou seja, com a mesma hierarquia de prioridades poderia consumir a um preço da eletricidade de acordo com as suas necessidades e flexibilidade de utilização das cargas controláveis. No entanto esta ferramenta tem como desvantagem o facto de não permitir uma alteração imediata da hierarquia de prioridades existente num dos modos, ou seja, se o consumidor pretender uma hierarquia de prioridades que não esteja contemplada nos modos pré-definidos, é necessário criar um controlador *fuzzy* para a nova hierarquia pretendida. No modelo DR criado no subcapítulo 3.6 pretende-se dar maior flexibilidade à gestão do consumo da potência disponível em cada modo dando a possibilidade ao consumidor de redistribuir o consumo da potência disponível. Essa redistribuição é feita prescindindo das primeiras cargas prioritárias fazendo com que as últimas passem a estar disponíveis.

Relativamente à construção dos conjuntos de dados e à técnica de *clustering*, a constante r_a, que é atribuída no *subtractive clustering*, e a precisão de potência, com que são construídos os conjuntos de dados, são importantes porque estão diretamente relacionados com a capacidade de agrupar a informação similar e logo com a capacidade do controlador *fuzzy* processar corretamente os estados das cargas controláveis. No modelo DR criado no subcapítulo 3.6, foram definidos os conjuntos de dados com um intervalo de potência de 100W, porque se assumiu que era sempre com essa precisão que os dados de potência eram inseridos no controlador. No entanto para o mesmo r_a o

controlador não é tão eficaz para precisões de informação de potência menores ou maiores. Pode-se concluir então que dependendo da precisão que se pretenda utilizar no controlador *fuzzy* e dependendo da possibilidade dessa precisão variar devem-se construir os conjuntos de dados adequadamente e utilizar um valor de r_a de forma a que o controlador *fuzzy* desempenhe a sua função de forma adequada ao modelo pretendido.

A metodologia apresentada é válida para qualquer intervalo de tempo pretendido visto que todo o processo de construção dos conjuntos de dados apenas depende da potência e nunca do tempo. Apenas se deve ter em atenção que o tempo de processamento de todo o processo de obtenção dos estados das cargas controláveis deve ser mais rápido do que o intervalo de tempo que a rede de energia elétrica disponibiliza a informação necessária.

Capítulo 4

Análise do modelo de *Demand Response*

Resumo

Neste capítulo caracteriza-se o veículo elétrico utilizado no estudo no subcapítulo 4.1 e apresentam-se os resultados e análise do impacte do modelo DR a partir de casos de estudo realizados numa residência e numa rede de energia elétrica nos subcapítulos 4.2 e 4.3, respetivamente. Para ambas as situações avalia-se o impacte do modelo DR com e sem a integração do veículo elétrico. No subcapítulo 4.4 apresentam-se as conclusões deste capítulo.

4.1. Introdução

Neste capítulo pretende-se integrar o modelo DR elaborado em 3.6 numa residência e numa rede de energia elétrica. Também é objeto de estudo neste capítulo a integração do modelo DR com o veículo elétrico.

Primeiro é explicado os possíveis impactes no funcionamento do modelo DR devido ao aumento de potência provocado pelo carregamento das baterias do veículo elétrico, bem como as características principais do veículo elétrico utilizado no estudo. Depois, são efetuados estudos com a integração do modelo DR numa residência e numa rede de energia elétrica através de casos de estudo. Dos vários casos de estudo, existe um em que o consumidor não utiliza o modelo DR com o intuito de servir de comparação com os restantes casos de estudo onde o modelo DR é utilizado. É ainda elaborado um caso de estudo onde se integra o modelo DR com o veículo elétrico, não sendo no entanto o veículo elétrico controlado pelo modelo DR, porque se considera que o veículo elétrico será ligado à rede energia elétrica num horário restrito definido pela entidade gestora da rede e não de acordo com as necessidades ou opções do consumidor.

Por fim, são apresentadas as conclusões deste capítulo.

4.2. Integração do Veículo Elétrico

Os estudos sobre o impacte que um modelo DR poderá ter numa residência ou numa rede de energia elétrica são essenciais para perceber a resposta destes em relação à aplicação do modelo DR. A implementação do modelo DR poderá levar a alterações quer no diagrama de consumo de uma residência quer no diagrama de geração quer nas perdas por efeito de Joule de uma rede de energia elétrica. A integração do veículo elétrico neste estudo também é essencial, visto que numa residência a potência necessária para carregar as baterias do veículo elétrico poderá influenciar o horário de funcionamento de algumas cargas controláveis. O facto de ser um tipo de veículo que no futuro poderá ter uma ampla aderência por parte da população, significa que pode representar uma carga considerável para a rede de energia elétrica,

podendo, por exemplo, modificar os diagramas de geração e aumentar as perdas por efeito de Joule.

A análise da integração do veículo elétrico na rede de energia elétrica é já objeto de estudo há algum tempo, sendo que já existem muitos estudos sobre essa integração, quer teoricamente [46], [47], [48] quer na prática com a análise em redes de energia elétrica de cidades, [49], [50], [51]. Neste trabalho o objetivo consiste em analisar o impacte do veículo elétrico na integração do modelo DR numa residência e numa rede de energia elétrica.

Existem vários tipos de veículos elétricos [52], no entanto os considerados neste estudo são os denominados *Plug-in*, ou seja, são considerados os veículos elétricos cujas baterias podem ser carregadas através de uma fonte externa ao veículo, por exemplo a partir da rede de energia elétrica. Deste tipo de veículo elétrico existem essencialmente 2 categorias; os *Plug-in Hybrid Eletric Vehicles* (PHEV) e os *Plug-in Eletric Vehicles* (PEV) ou *Battery Eletric Vehicle* (BEV). O que difere um do outro é que o primeiro possui dois tipos de motor, um elétrico e um de combustão interna enquanto o segundo apenas possui um motor elétrico. Ao nível do impacte na rede de energia elétrica os PEV representam um maior aumento no consumo de energia elétrica que os PHEV, pois a capacidade das suas baterias é maior porque a força motriz apenas depende do motor elétrico.

Posto isto, para a análise a efetuar neste trabalho é considerado um PEV, pois como as suas baterias têm maior capacidade logo o seu carregamento terá maior impacte na rede de energia elétrica que as baterias de um PHEV.

Além da capacidade das baterias do próprio veículo elétrico, também interessa qual o tipo de carregamento utilizado: Carregamento normal, utilizando um sistema monofásico, ou carregamento rápido, utilizando um sistema trifásico [53]. O carregamento normal pode ser efetuado a partir de uma tomada doméstica de 230V. A potência consumida é mais baixa, no entanto o carregamento pode durar até 6h ou 7h. O carregamento rápido é efetuado através de uma tomada trifásica e a potência consumida é maior, no entanto o carregamento é efetuado de forma mais rápida, podendo durar até 1h.

Neste trabalho foi considerado o carregamento o normal, porque se assumiu ser este o tipo de carregamento mais provável de ser utilizado numa residência. Uma tomada típica permite carregar as baterias até 15A. A uma tensão de 230V significa que é possível carregar as baterias a uma potência aproximada de 3.4 kW. O veículo utilizado para este estudo foi o Nissan Leaf que utiliza uma bateria de 24 kWh. Segundo [47] para otimizar o ciclo de vida das baterias estas não devem exceder os 80% de utilização e é considerado um rendimento de 90% para os retificadores. O número de horas que as baterias necessitam para carregarem é calculado de acordo com as expressões (4.1) e (4.2).

De seguida calcula-se o número de horas que as baterias necessitam para carregarem.

$$E_{necessária} = \frac{E_{baterias}x0.80}{\eta} = \frac{24 * 0.80}{0.9} = 21.3\ kWh \quad \textbf{(4.1)}$$

Onde $E_{necessária}$ é a energia necessária para carregar as baterias, $E_{baterias}$é a capacidade das baterias e η é o rendimento dos inversores.

$$h_{carregamento} = \frac{E_{necessária}}{P_{tomada}} = \frac{21.3}{3.4} = 7\ horas \quad \textbf{(4.2)}$$

Onde $h_{carregamento}$ é o número de horas para carregar completamente as baterias e P_{tomada} é a potência tipicamente disponível numa tomada de uma residência.

Neste capítulo o veículo elétrico foi considerado com uma carga não controlável, porque foi assumido que o carregamento das baterias apenas é permitido num horário restrito, nomeadamente no intervalo entre as 22h e as 7h. A restrição no horário de carregamento das baterias visa minimizar o provável aumento que poderá ocorrer na potência de ponta.

4.3. Análise de resultados para uma residência

O impacte do modelo de DR numa residência será analisado tendo em conta casos de estudo, apresentando-se para cada um os resultados e a respetiva análise.

Com os casos de estudo considerados pretende-se demonstrar que um consumidor que utilize o modelo DR proposto esteja inserido num ambiente onde a potência disponível e o preço da eletricidade variam ao longo do dia, consegue colocar as mesmas cargas em funcionamento e com o mesmo número de vezes que um consumidor desregrado. Para isso são definidas tarefas, em que estas tarefas representam o número de vezes e o tempo que as cargas controláveis consideradas no modelo DR estão ligadas por um consumidor desregrado.

A análise será feita com base em 4 casos de estudo, sendo o primeiro para um regime desregrado, em que o consumidor não é influenciado pelo preço da eletricidade e pela potência disponível, representando um diagrama típico atual e com base no qual são definidas tarefas a alcançar pelo consumidor considerado no caso de estudo 2. O segundo caso de estudo apresenta o impacte do modelo num regime considerado normal, em que o consumidor é influenciado pela variação do preço da eletricidade e pela variação da potência disponível e onde se pretende que o consumidor consiga executar as mesmas tarefas apresentadas no primeiro caso de estudo. No terceiro caso de estudo é analisado o impacte que um PEV poderá ter numa residência que tenha aderido ao modelo DR e por fim no quarto caso de estudo é analisado o impacte do modelo para um regime de contingência em que a potência disponível diminui consideravelmente de forma a garantir os níveis de segurança e qualidade da rede de energia elétrica.

Os diagramas de consumo e geração considerados nos 4 casos de estudo têm um horizonte temporal de 24h, estando os dados disponíveis em intervalos de uma hora. Estes diagramas contemplam as cargas controláveis e não controláveis utilizadas pelo consumidor, onde as potências para as cargas controláveis e não controláveis foram consideradas de acordo com [23].

Nos casos de estudo considera-se a análise de um dia de semana comum de um casal sem filhos. Admite-se que o casal tem um horário de trabalho entre as 9h e as 19h e que fica acordado até cerca da 1h. De referir ainda que se considerou que no caso das cargas controláveis que funcionam com base num programa, como a máquina de secar, quando dão inicio ao seu programa têm de o terminar, não podendo haver interrupções.

Caso de estudo 1 – Regime desregrado

Considerando o regime desregrado, o consumo é feito sem que o consumidor seja influenciado pela variação do preço da eletricidade ou da potência disponível, ficando apenas dependente da vontade do casal querer ou não ligar os equipamentos de que dispõe. O consumo das cargas controláveis é feito apenas quando o casal está em casa e acordado.

A Figura 4.1 apresenta o diagrama de consumo desregulado por parte do casal.

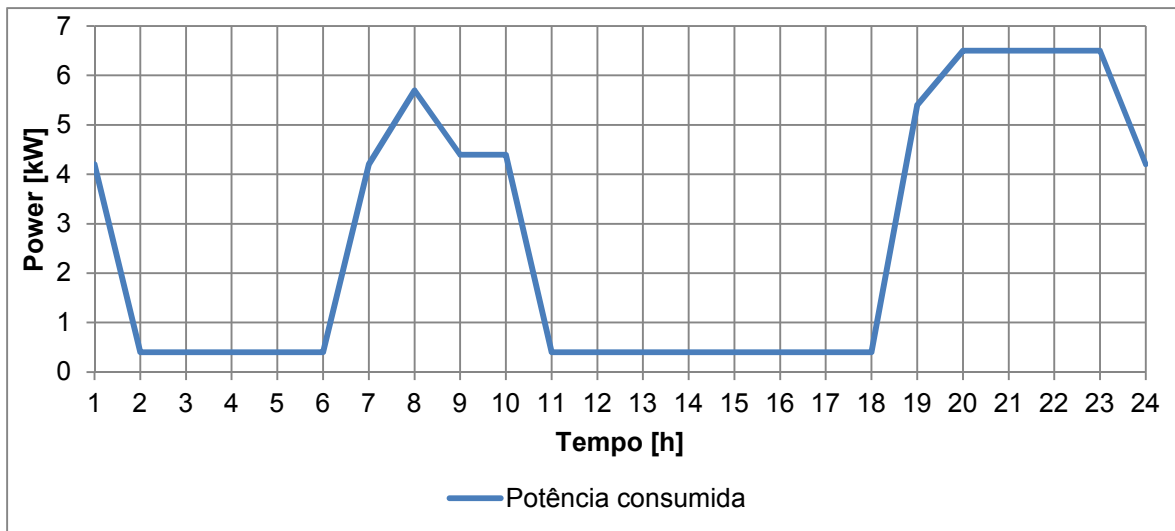



Figura 4.1 – Diagrama de consumo desregrado de um casal sem filhos.

É possível observar na Figura 4.1 que existem intervalos de tempo onde a potência consumida se refere às cargas não controláveis, nomeadamente o frigorífico e o congelador. Verifica-se que no intervalo entre as 2h e as 6h, onde o preço da eletricidade tem maior probabilidade de ser mais barato, uma vez que

corresponde ao período de vazio, o consumo é mínimo. O diagrama de consumo apresentado não tem em conta as variações de preço da eletricidade que poderia contribuir para a diminuição da fatura da eletricidade ao final do mês, mediante gestão das cargas por parte do consumidor. Por outro lado, existem picos de potência consumida que podem levar a contingências na rede de energia elétrica, nos intervalos de tempo entre as 7h e as 10h e entre as 19h e 23h, por corresponderam a horas de ponta. Devido às possíveis contingências provocadas por estes picos de consumo, o consumidor pode sair prejudicado, pois pode levar ao corte do fornecimento de energia elétrica.

Na Figura 4.2 é possível observar o estado das cargas controláveis ao longo do dia relativamente a este caso de estudo.

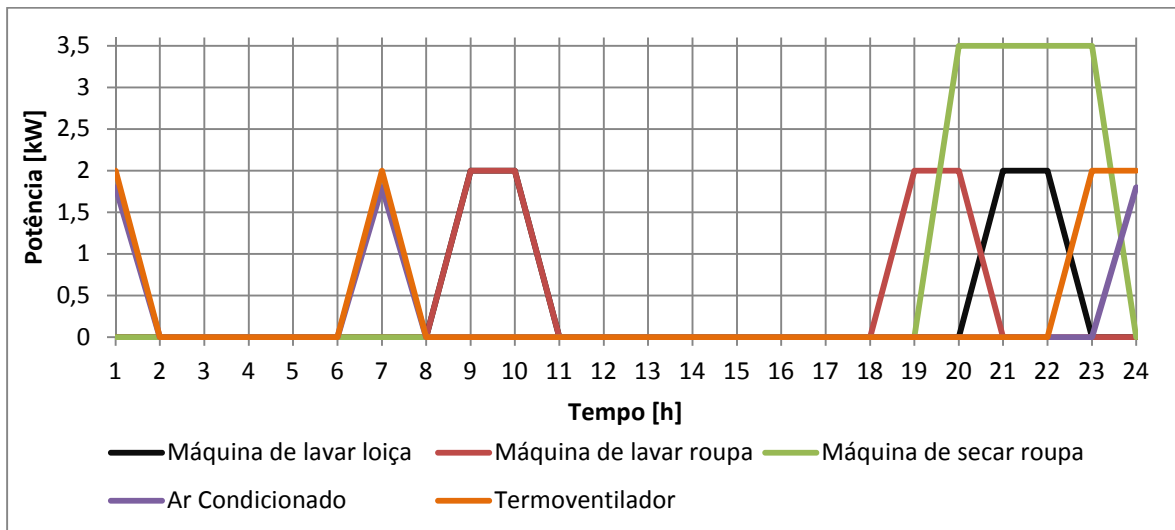



Figura 4.2 – Evolução do estado das cargas controláveis.

A Figura 4.2 permite observar que as máquinas de secar roupa, lavar roupa e de lavar loiça funcionam duas vezes por dia, enquanto o ar condicionado funciona da 23h às 2h e das 6h às 8h. O termoventilador funciona das 22h às 2h e das 6h às 8h. Estas serão as tarefas que nos casos de estudo seguintes, com a aplicação do modelo DR, se deverão alcançar. Assim, pretende-se provar que mesmo com a aplicação do modelo de DR o consumidor poderá desempenhar as mesmas tarefas contempladas neste caso de estudo, embora com alteração dos respetivos horários de funcionamento.

De notar que o termoventilador foi colocado a funcionar durante 7 horas. Estas horas de utilização são consideradas excessivas pois não é espectável que este funcione durante tantas horas. No entanto foram consideradas porque se pretendia elevar a potência consumida de forma a tornar o diagrama de consumo mais exigente e portanto mais difícil para o modelo DR conseguir atingir o objetivo de cumprir todas as tarefas.

Caso de estudo 2 – Regime Normal

Neste caso de estudo o objetivo é avaliar o desempenho do modelo, apresentado no subcapítulo 3.6, onde a potência disponível ao consumidor e o preço da eletricidade, são variáveis ao longo do dia.

Pretende-se apresentar os resultados do modelo para o regime normal, em que a potência varia em torno do valor máximo de 6.9kW, simulando-se assim alguma intermitência das fontes renováveis de energia. Considera-se como regime normal, a variação da potência disponível e do preço da eletricidade representados nos gráficos apresentados na Figura 4.3. O diagrama de consumo base tem por base o diagrama de consumo apresentado na Figura 4.1, no entanto as cargas controláveis não são contabilizadas visto que se pretende que seja o modelo a decidir sobre o estado das mesmas. Em suma, a potência de consumo base é a potência de todas as cargas utilizadas pelo consumidor com exceção das cargas controláveis.

Na tabela 1 do apêndice 2 são apresentados os dados de entrada, referentes às escolhas dos perfis e modos do consumidor. Na Figura 4.3 é apresentada a potência de consumo base, potência disponível e o preço da eletricidade.

Neste caso de estudo compara-se a resposta do modelo para os perfis económico e moderado e faz-se a análise dos resultados. Posteriormente e tirando partido de todas as potencialidades do modelo, no que diz respeito, por exemplo, à variação do perfil e modo de consumo ao longo do dia ou à gestão das cargas controláveis prioritárias desseleccionando as primeiras, elabora-se um

possível perfil onde as tarefas requeridas pelo consumidor desregrado são todas executadas.

Para a comparação dos resultados do modelo para o perfil económico e moderado assume-se que para ambas as situações o consumidor escolhe o modo conforto quando está em casa e acordado e o modo asseio quanto está fora de casa ou a dormir.

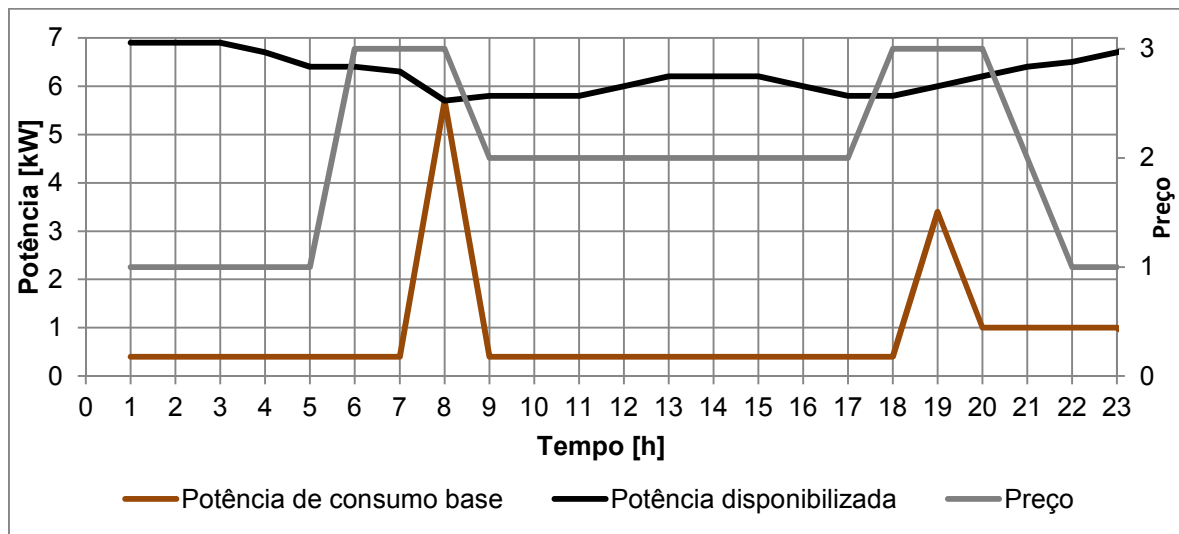



Figura 4.3 – Evolução da potência disponível, da potência de consumo base e do preço da eletricidade.

Como é possível observar na Figura 4.3 entre as 6h às 8h e entre as 18h e as 20h o preço da eletricidade é mais alto enquanto no intervalo entre as 22h e as 5h o preço é o mais baixo.

As cargas controláveis deveriam ser ligadas no período onde o preço da eletricidade é mais baixo beneficiando economicamente o consumidor. Com os vários perfis disponibilizados pelo modelo pretende-se que o consumidor beneficie de preços mais baixos da eletricidade, no entanto a flexibilidade do consumidor também é um fator importante de acordo com o apresentado nas análises seguintes.

Para as condições representadas graficamente na Figura 4.3 aplicou-se o modelo, para os perfis económico e moderado de forma a obter o estado das cargas controláveis ao longo do dia. A Figura 4.4 e a Figura 4.5 apresentam os

diagramas de potências para o perfil económico e moderado, respetivamente. De referir que nestas figuras a potência consumida pelas cargas controláveis é somada à potência de consumo base.

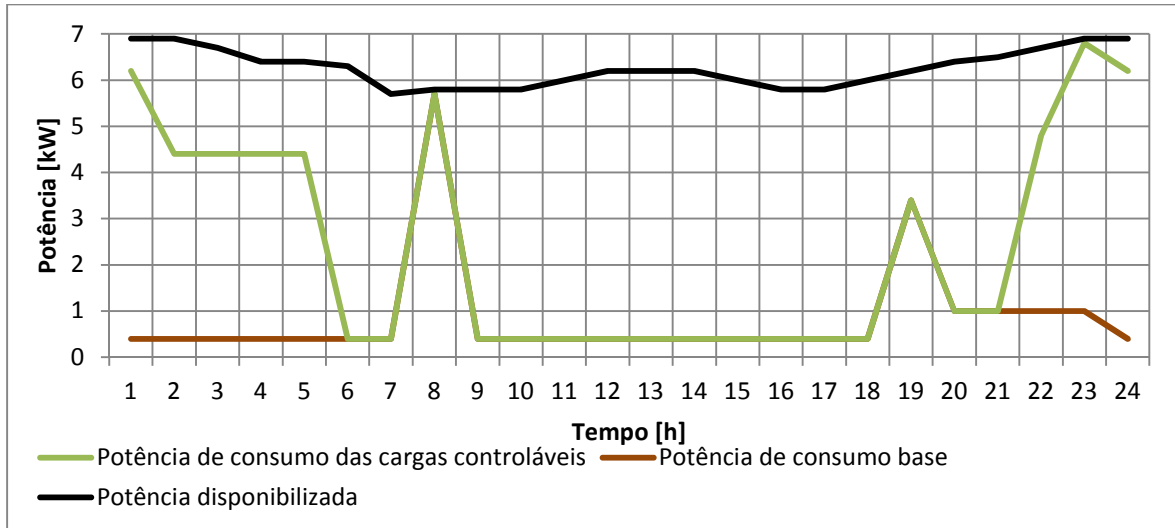



Figura 4.4 – Evolução da potência disponibilizada, da potência de consumo base e da potência consumida pelas cargas controláveis para o perfil económico.

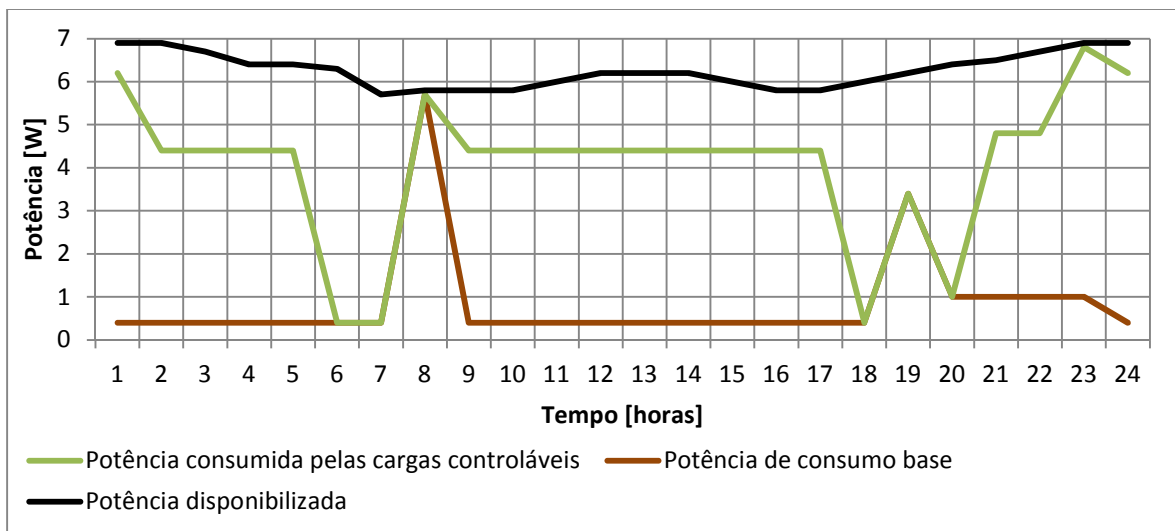



Figura 4.5 – Evolução da potência disponibilizada, da potência de consumo base e da potência consumida pelas cargas controláveis para o perfil moderado.

A Figura 4.4 e a Figura 4.5 indicam que o modelo garante que a potência consumida não ultrapassa a potência disponível fornecida pela rede de energia elétrica. A diferença existente entre a potência disponível e a soma das potências consumidas, de base e das cargas controláveis, resulta do facto do modelo não permitir que mais cargas controláveis possam estar disponíveis quando disto

resulta uma potência consumida superior à potência disponível, o que seria impossível.

Através dos relatórios do simulador, apresentados nas tabelas 1 dos apêndices 4 e 5, para ambos os perfis é possível observar que na hora 8, apesar do preço ser demasiado alto para o perfil selecionado, nenhuma carga controlável está disponível porque não existe suficiente potência disponível suficiente. A Figura 4.6 e a Figura 4.7 apresentam, respetivamente, para o perfil económico e moderado, os estados das cargas controláveis individualmente, ao longo do dia. Considerando a Figura 4.3 até à Figura 4.7 é possível analisar a influência do preço da eletricidade e do perfil escolhido pelo consumidor nos estados das cargas controláveis. Repare-se, por exemplo, na Figura 4.4 e na Figura 4.6 no intervalo entre as 22h e as 5h, existem cargas controláveis no estado ativo, no entanto fora desse intervalo tal nunca acontece. Isto deve-se ao facto de apenas nesse intervalo de tempo o preço da eletricidade corresponder ao intervalo 1, que é o único admissível no perfil económico.

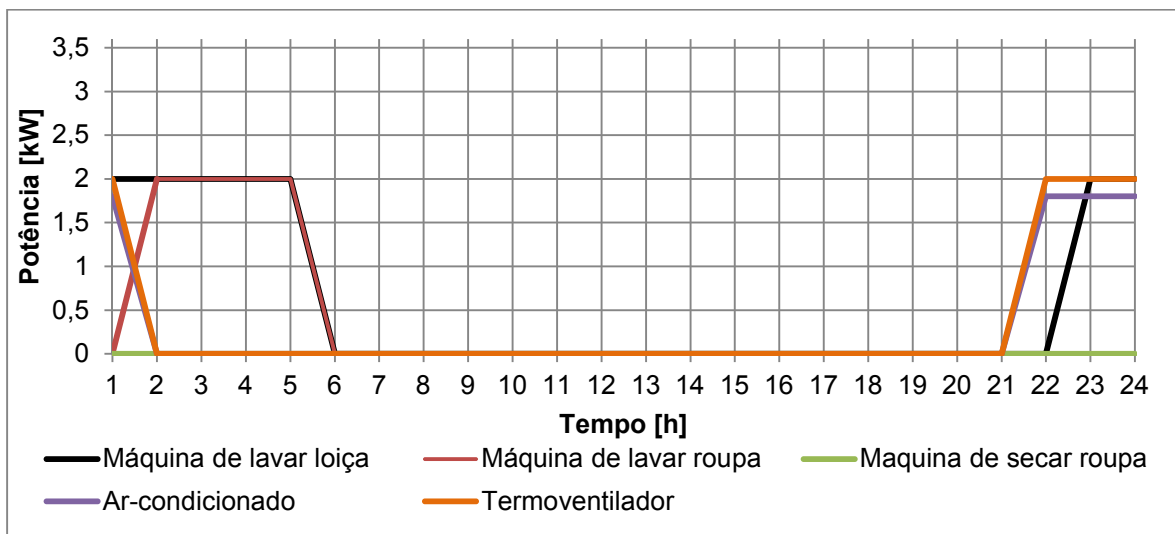



Figura 4.6 – Evolução do estado das cargas controláveis no perfil económico.

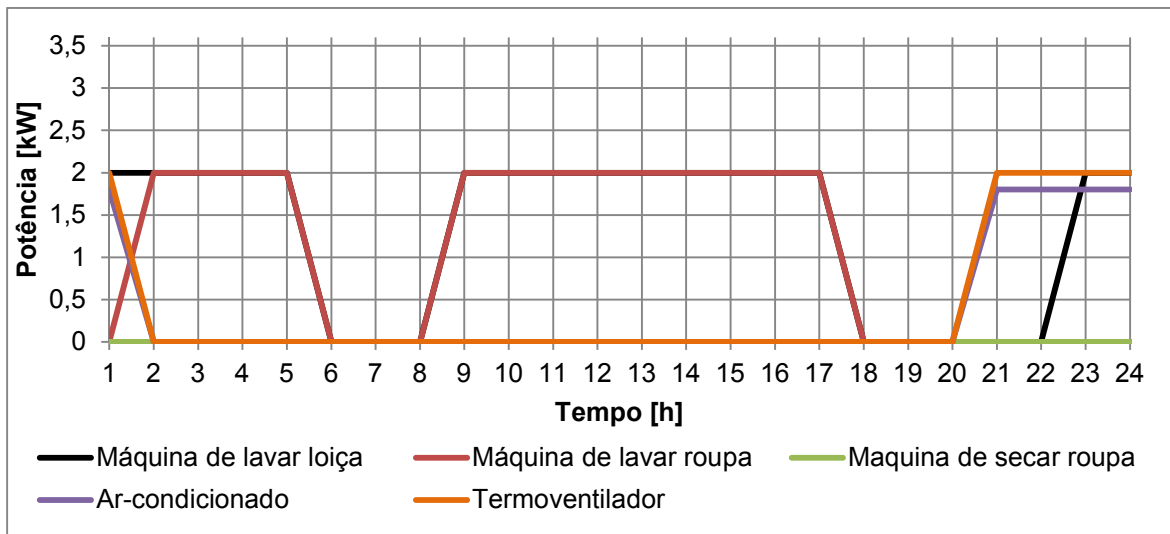



Figura 4.7 – Evolução do estado das cargas controláveis no perfil moderado.

Comparando a Figura 4.6 e a Figura 4.7 e analisando os respetivos relatórios de simulação, apresentados nas tabelas 1 dos apêndices 4 e 5, é possível concluir que a restrição do preço da eletricidade no perfil económico implica que, ao longo do dia, as cargas controláveis estejam poucas vezes disponíveis. Já no caso do perfil moderado, como a restrição do preço da eletricidade é menor, ou seja o consumidor admite pagar um preço da eletricidade mais alto, as cargas controláveis estão mais vezes disponíveis. Para o perfil exigente, sem restrições de preço da eletricidade, os estados das cargas controláveis apenas ficam dependentes da potência disponibilizada.

Assim, pode-se concluir que o consumidor deverá ter maior flexibilidade de horário para colocar as cargas controláveis em funcionamento quanto menos quiser pagar pela eletricidade. Por exemplo, um consumidor no perfil económico tem de ter maior flexibilidade pois as cargas controláveis estão menos tempo disponíveis, podendo influenciar o consumidor a alterar algumas rotinas e hábitos por forma a colocar em funcionamento as suas cargas controláveis. Já um consumidor que utilize o perfil moderado não necessita de ter tanta flexibilidade de horário no entanto terá períodos onde pagará mais pela eletricidade do que no perfil económico. Por fim, se o consumidor quiser utilizar as cargas controláveis nas horas que pretender independentemente do preço, poderá selecionar o perfil exigente.

No entanto, a melhor forma de potencializar o modelo é tirando partindo das várias opções disponibilizadas, como a escolha de diferentes perfis e modos ao longo do dia, que possibilita ao consumidor pagar a energia a um preço que esteja de acordo com as suas necessidades de consumo. O modelo também permite a racionalização da potência disponibilizada para as cargas controláveis de menor prioridade desseleccionando as primeiras prioridades de modo a que as últimas possam estar disponíveis. Repare-se que na Figura 4.6 e na Figura 4.7, a máquina de secar roupa nunca está no estado disponível. Isto deve-se ao facto de, por exemplo, no modo asseio ser a prioridade 3, de acordo com a Tabela 3.3. Significa que nunca existe potência suficiente para colocar em funcionamento simultâneo, as máquinas de lavar loiça, lavar roupa e secar roupa.

De seguida, é apresentado na Figura 4.8 um diagrama de consumo final que permite ao consumidor executar as mesmas tarefas que são requeridas no caso de estudo 1. Na Figura 4.8 a potência de base e a potência de consumo das cargas controláveis aparecem descriminadas, mas no entanto os seus resultados estão somados. Os dados de entrada para esta situação são apresentados na tabela 1 do apêndice 6 e o relatório da simulação é apresentado na tabela 1 do apêndice 7.

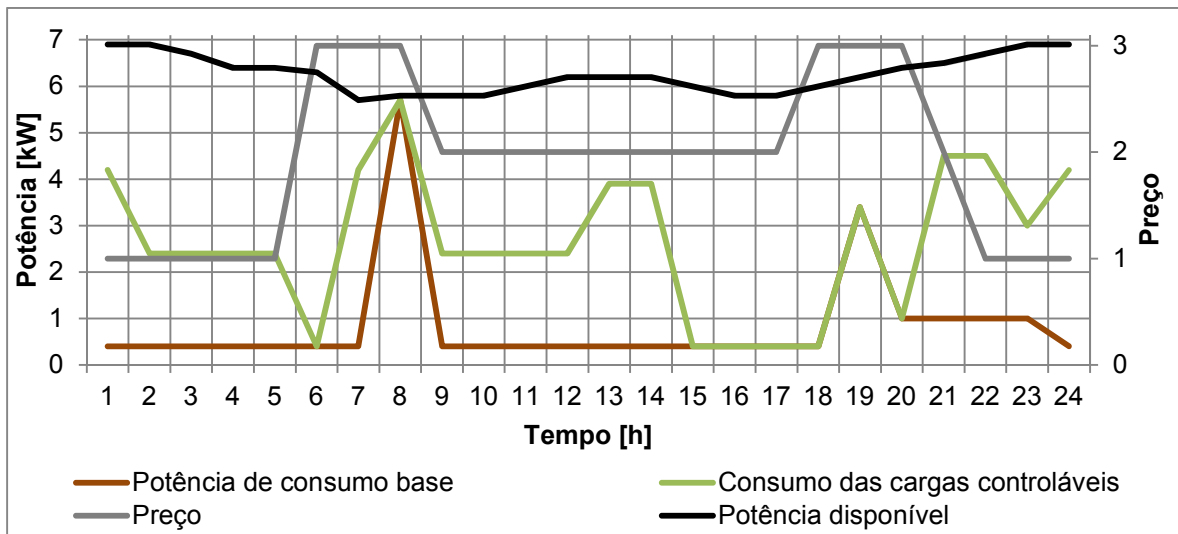



Figura 4.8 – Evolução da potência disponível, da potência de consumo base, da potência de consumo das cargas controláveis e do preço da eletricidade.

Comparando a Figura 4.1 e a Figura 4.8 verifica-se que na Figura 4.8 a potência das cargas controláveis está mais distribuída ao longo das 24h. Isto verifica-se porque enquanto na Figura 4.1 o preço da eletricidade não influencia o horário que o consumidor escolhe para colocar as suas cargas controláveis a funcionar, a Figura 4.8 evidencia que consumidor teve essa preocupação, visto que lhe trazia benefícios económicos.

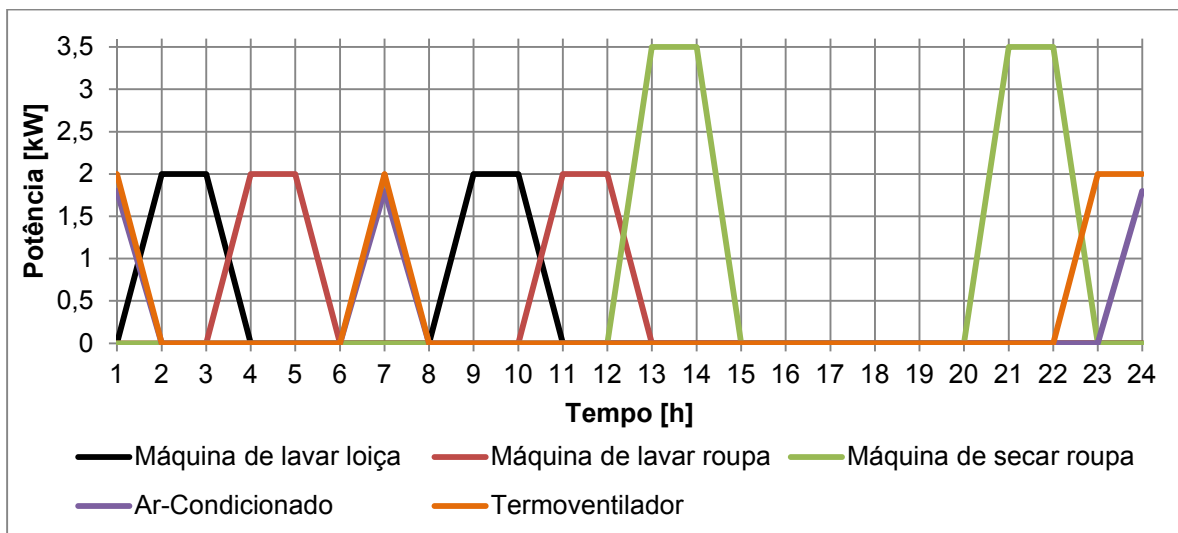



Figura 4.9 – Evolução do estado das cargas controláveis.

Através da análise da Figura 4.2 e da Figura 4.9 é possível concluir que implementando o modelo de DR se consegue executar todas as tarefas efetuadas pelo consumidor no caso de estudo 1. Das 15h às 20h não existe potência

consumida pelas cargas controláveis porque todas as tarefas foram concluídas com exceção da máquina de secar à qual ainda lhe falta uma tarefa. No entanto, assume-se que é necessária intervenção humana para a recarregar com roupa e como se assume que os consumidores chegam do trabalho às 19h, então o consumidor liga a máquina de secar roupa apenas quando chega a casa.

Caso de estudo 3 – Influência do PEV

Com a integração do PEV, apresentado no subcapítulo 4.2, a potência disponível para as cargas controláveis é menor, pois à potência de consumo base é adicionada a potência associada para o carregamento das baterias do PEV. Sendo assim analisou-se o efeito da integração do veículo elétrico no estado das cargas geridas pelo modelo de DR do cenário 2. Colocaram-se as baterias a carregar entre a 22h e as 4h, porque às 6h o preço da eletricidade assume um valor dentro do intervalo 3.

Os resultados da simulação do modelo para esta situação são apresentados na Figura 4.10 e na Figura 4.11, em que na primeira é apresentada a evolução da potência disponível, a potência de consumo base e a evolução do preço da eletricidade e na segunda é apresentado o estado das cargas controláveis ao longo do dia.

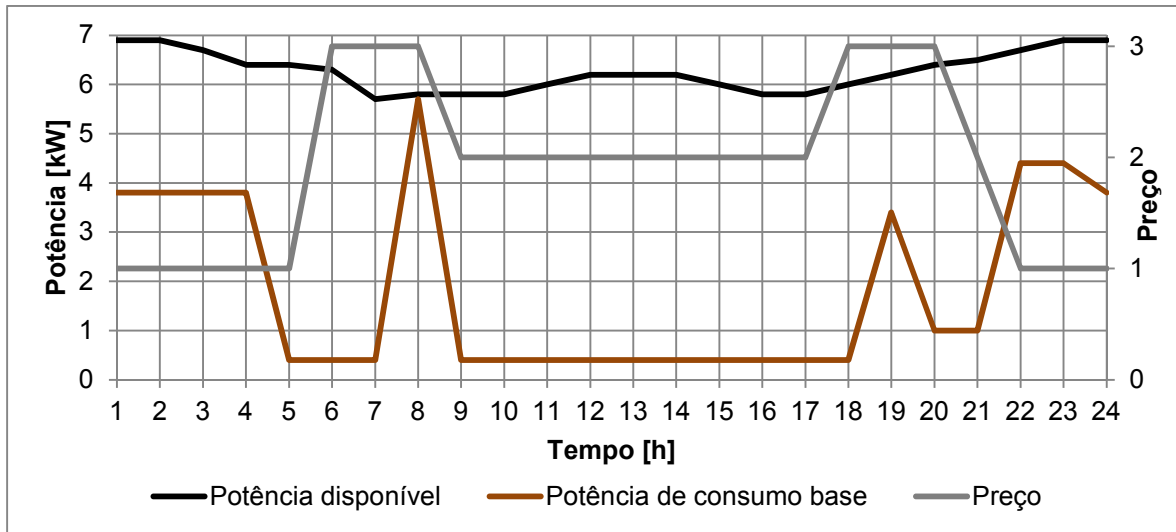



Figura 4.10 – Evolução da potência disponível, potência consumida base e do preço da eletricidade.

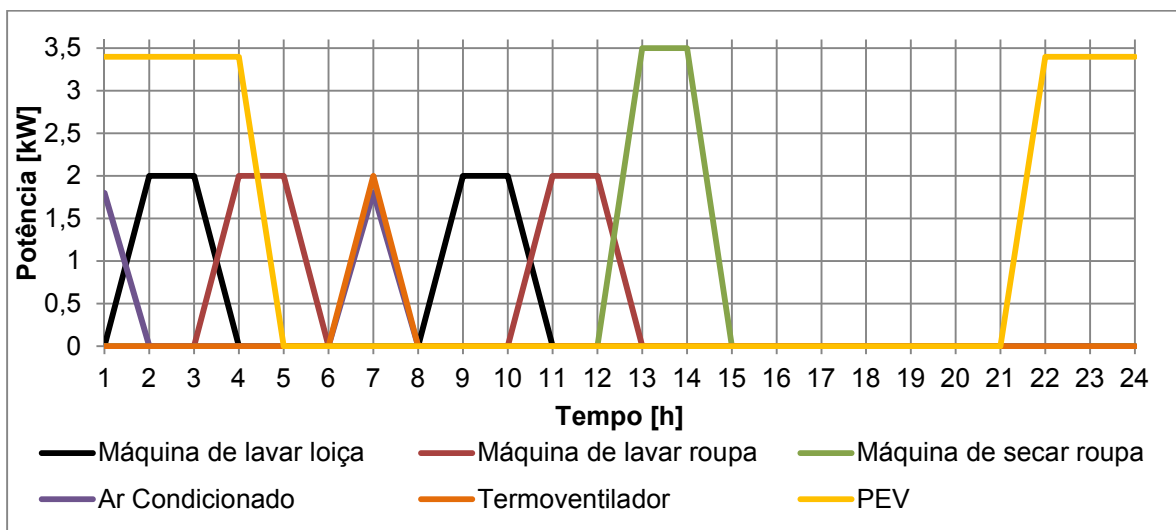



Figura 4.11 – Evolução do estado das cargas controláveis.

Observando a Figura 4.10, verifica-se que nas horas onde o veículo elétrico está a carregar a potência consumida aumenta mas fica abaixo da potência disponível, ou seja, existe ainda potência disponível para as cargas controláveis. No entanto, esta potência é menor quando comparada com a Figura 4.8, o que limita a disponibilidade das cargas controláveis. Comparando a Figura 4.9 com a Figura 4.11 pode-se concluir que o consumidor não poderá executar todas as tarefas pretendidas com os perfis e modos, apresentados na tabela 1 do apêndice 2, que selecionou para o segundo caso de estudo.

Na Figura 4.9, considerando o intervalo de tempo entre as 20h e as 23h e atendendo por exemplo, à máquina de secar roupa é possível observar que esta carga controlável estava a funcionar. No entanto na Figura 4.11 verifica-se que com o carregamento das baterias não existe potência suficiente para a ligar. A disponibilidade do termoventilador também é afetada, visto que o consumidor já não o pode ligar das 23h às 2h também devido ao carregamento das baterias.

De modo a ser coerente com os casos de estudo anteriores, elaborou-se um perfil que permitisse realizar todas as tarefas requeridas pelo consumidor no caso de estudo 1, ou caso seja impossível que permitisse realizar o máximo possível de tarefas.

As Figura 4.12 e Figura 4.13 apresentam o diagrama de consumo e o estado das cargas controláveis para o novo perfil.

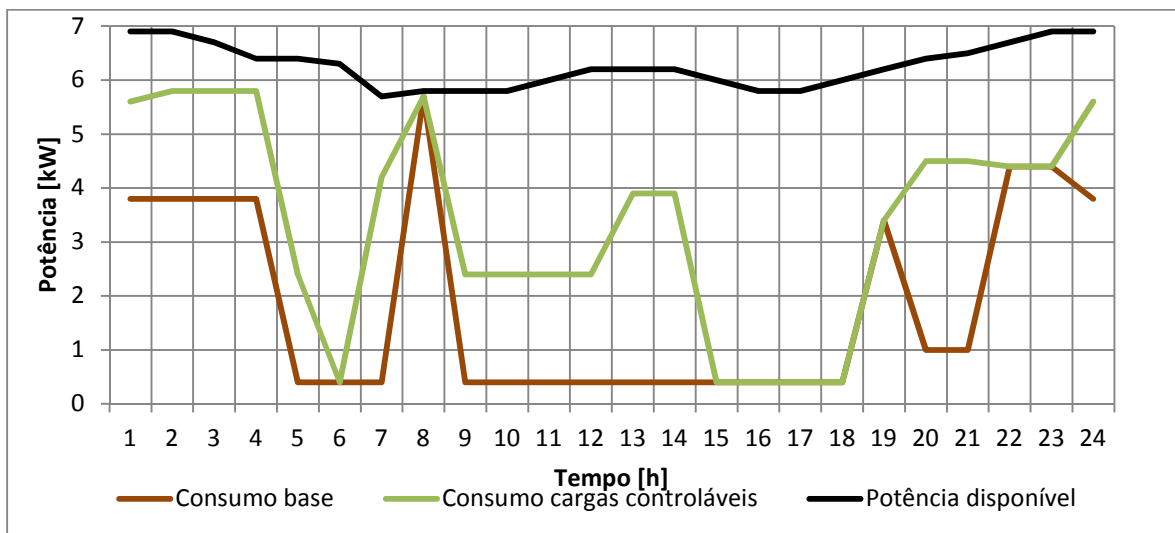



Figura 4.12 – Evolução da potência disponível, da potência de consumo base e da potência consumida pelas cargas controláveis.

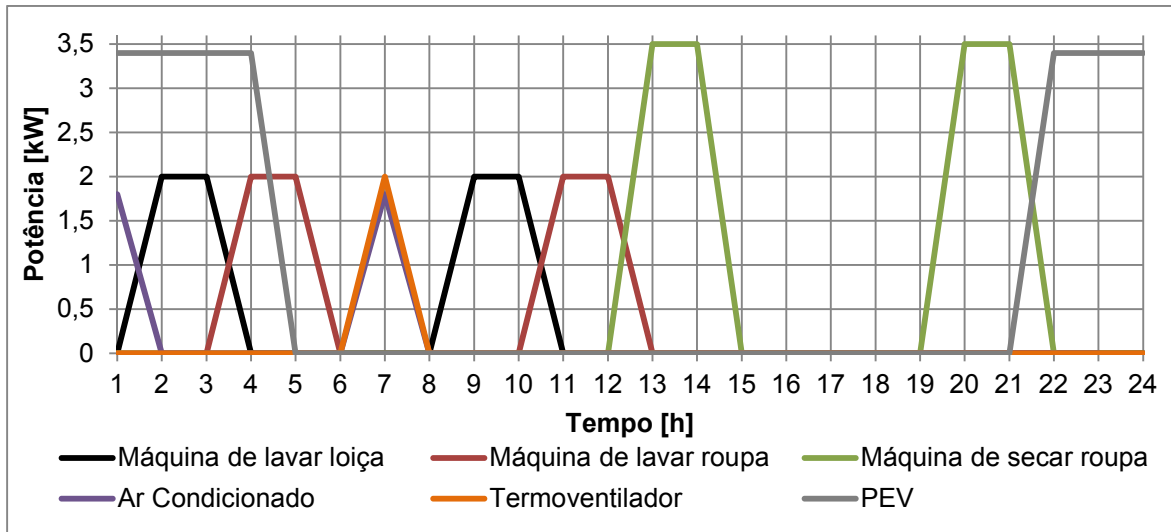



Figura 4.13 – Diagrama de estado das cargas controláveis.

Com o novo perfil conseguiu-se colocar a máquina de secar a funcionar as duas vezes pretendidas, no entanto esta situação só aconteceu porque o consumidor passou a utilizar esta carga controlável num intervalo de tempo onde o preço da eletricidade é mais caro e portanto estava a utilizar o perfil exigente. Relativamente ao termoventilador, não é possível coloca-lo a funcionar nas horas desejadas pelo consumidor pois não existe potência disponível suficiente devido ao carregamento das baterias.

Caso de estudo 4 – Regime de contingência

Neste caso de estudo pretende-se reproduzir uma situação em que a rede de energia elétrica sofre uma contingência resultando numa diminuição da potência disponível para a residência. Com isto, pretende-se concluir que se este modelo for adotado como uma estratégia de redução de carga em caso de contingência, à semelhança dos programas IBP, as prioridades do consumidor são respeitadas.

Para este caso de estudo são considerados os mesmos dados de entrada utilizados no diagrama final do caso de estudo 2, Figura 4.8, no entanto simulam-se duas contingências. A primeira entre as 6h e as 10h e a segunda entre as 22h e as 24h, pelo que a potência disponível irá ser reduzida para 3kW

em ambas. Nas horas de contingência o preço da eletricidade aumenta para o intervalo 3.

A Figura 4.14 apresenta os diagramas de potência disponível e de consumo base, bem como a evolução do preço da eletricidade ao longo do dia. A Figura 4.16 apresenta a evolução dos estados das cargas controláveis ao longo do dia.

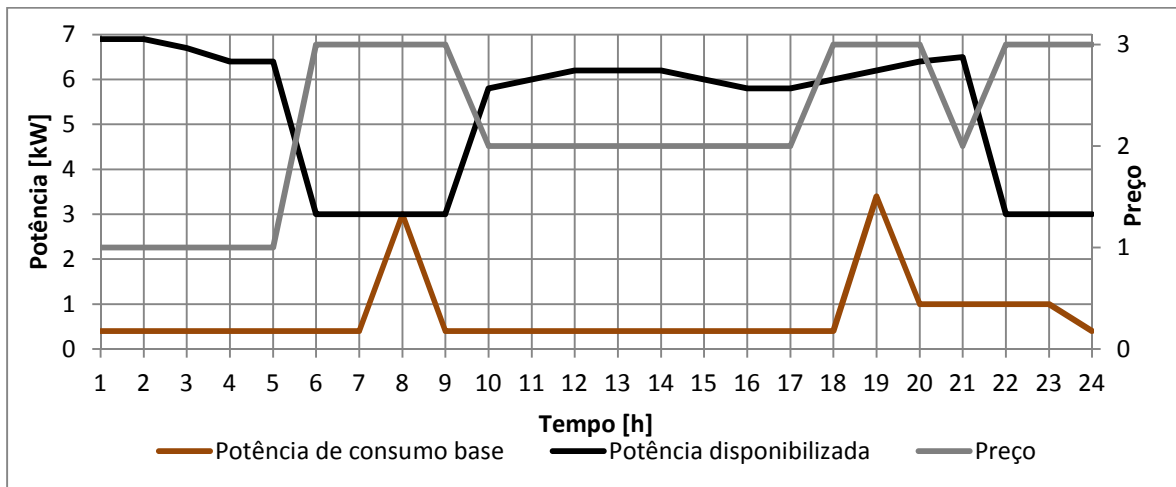



Figura 4.14 – Evolução da potência disponível, da potência de consumo base e do preço da eletricidade.

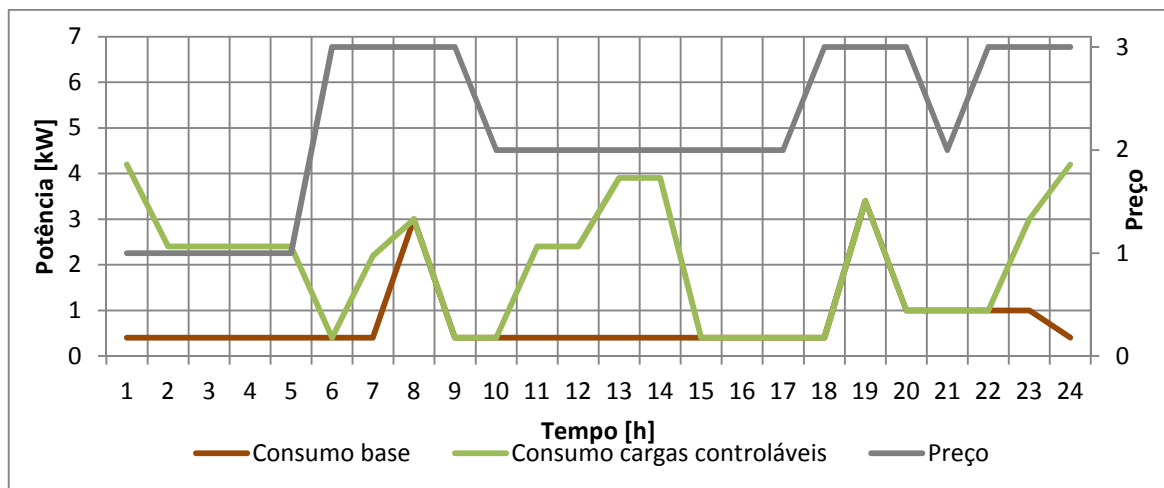



Figura 4.15 – Evolução da potência consumida pelas cargas controláveis, potência de consumo base e do preço da eletricidade.

Da Figura 4.15 verifica-se que com as contingências simuladas a potência consumida pelas cargas controláveis diminui tal como seria expectável.

Comparando a Figura 4.9 e a Figura 4.16 pode-se concluir que as prioridades foram respeitadas. Considerando a Figura 4.9 e atendendo ao modo conforto, na hora 8, as cargas controláveis disponíveis são o ar condicionado e o termoventilador sendo estas a primeira e segunda prioridades, respetivamente. Considerando a Figura 4.16, na mesma hora, como a potência disponível desceu para 3kW apenas o ar condicionado está disponível, respeitando as prioridades do consumidor. Na segunda contingência como a potência disponível é de apenas 3kW na hora 22 apenas o termoventilador funciona não havendo potência disponível suficiente para colocar o estado da máquina de secar roupa como disponível.

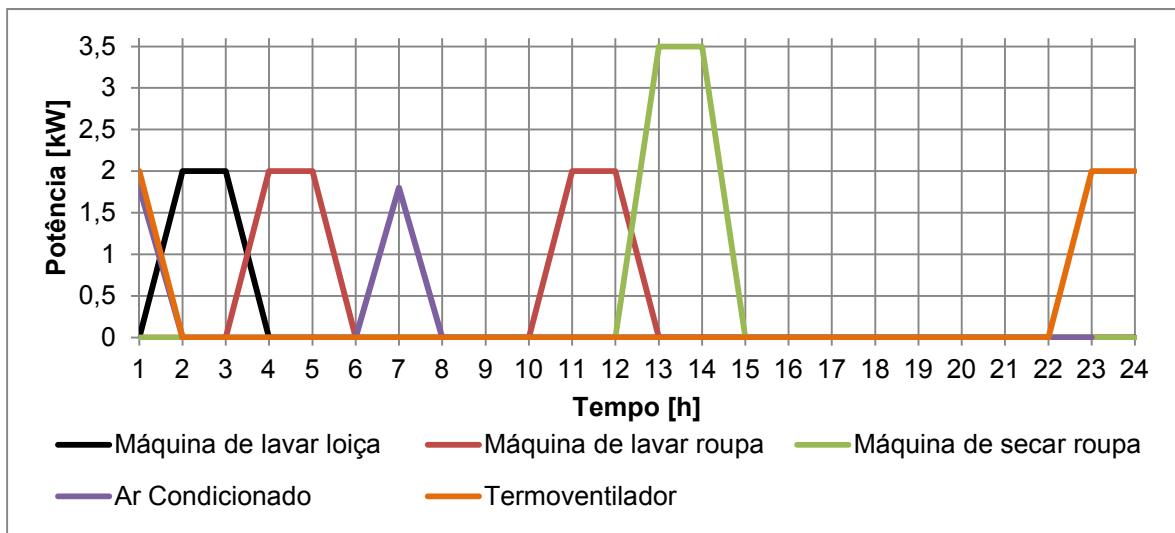



Figura 4.16 – Evolução do estado das cargas controláveis ao longo do dia.

4.4. Análise de resultados numa rede de energia elétrica

A análise do impacte do modelo DR na rede de energia elétrica será feita com base em vários casos de estudos baseados no subcapítulo 4.3. Em cada caso de estudo serão apresentados resultados para o diagrama de consumo de uma residência com e sem a integração do veículo elétrico.

Para este estudo será utilizada uma rede de energia elétrica com base no modelo de uma rede de energia elétrica IEEE 5 bus [1]. A rede de energia elétrica a ser analisada é apresentada na Figura 4.17. É constituída por 4 barramentos,

em que os barramentos 2, 3 e 4 representam cargas. As cargas representaram bairros com 200 residências cada um. Quanto à geração, esta é representada por um gerador. Os parâmetros utilizados para as linhas são apresentados na tabela 1 do apêndice 11.

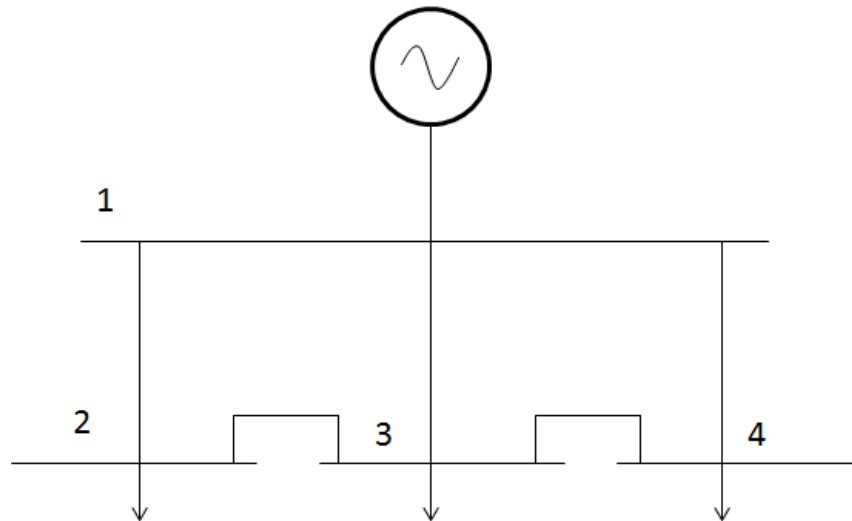



Figura 4.17 – Modelo da rede de energia elétrica.

Os parâmetros a serem analisados são o diagrama de geração, que se pretende que seja o mais uniforme possível evitando a existência de horas de pico e de vazio e minimizando as perdas por efeito de Joule. Quanto menor for a amplitude da potência nas horas pico e maior for nas horas de vazio mais uniforme será o diagrama de geração fazendo com que não se necessite de construir infraestruturas apenas para as horas de pico. No caso das perdas por efeito de Joule, estas são analisadas porque poderão baixar o preço da eletricidade.

Caso de estudo 1 – Regime desregrado

<u>Análise sem integração do PEV</u>

Neste caso de estudo é efetuada a análise do efeito do consumo desregrado, apresentado no caso de estudo 1 do subcapítulo 4.3, de acordo com a Figura 4.1, na rede de energia elétrica. A Figura 4.18 apresenta o diagrama de geração.

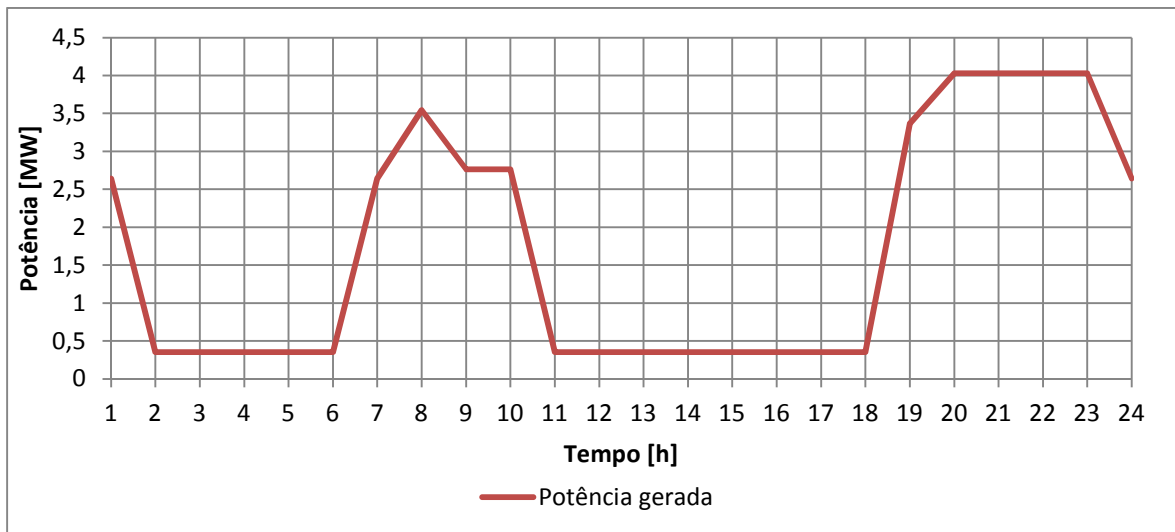



Figura 4.18 – Evolução da potência gerada na rede de energia elétrica.

Devido ao facto do consumidor apenas colocar a grande maioria das suas cargas em funcionamento quando está em casa leva a que as horas de ponta coincidam com esses períodos. Ao observar a Figura 4.18 pode-se concluir que a curva de consumo representa um dia de consumo em que as horas de ponta e vazio estão bem identificadas uma vez que existe uma diferença notória entre as potências consumida na hora de ponta e a potência consumida na hora de vazio.

O intervalo onde a potência consumida no período da ponta tem maior expressão é entre as 20h e as 23h uma vez que se mantém constante nos 4,03MW enquanto a potência consumida no período de vazio, é de cerca de 0,36MW resultando uma diferença de 3,67MW. Desta diferença resulta a necessidade de construir infraestruturas, como centrais ou linhas de transmissão e distribuição, para que se consiga satisfazer a potência consumida nas horas de ponta mas que no entanto nas horas de vazio funcionam em regimes de baixo rendimento ou mesmo em regime *stand-by* onde apenas acarretam custos.

A Figura 4.19 apresenta a evolução das perdas por efeito de Joule na rede de energia elétrica.

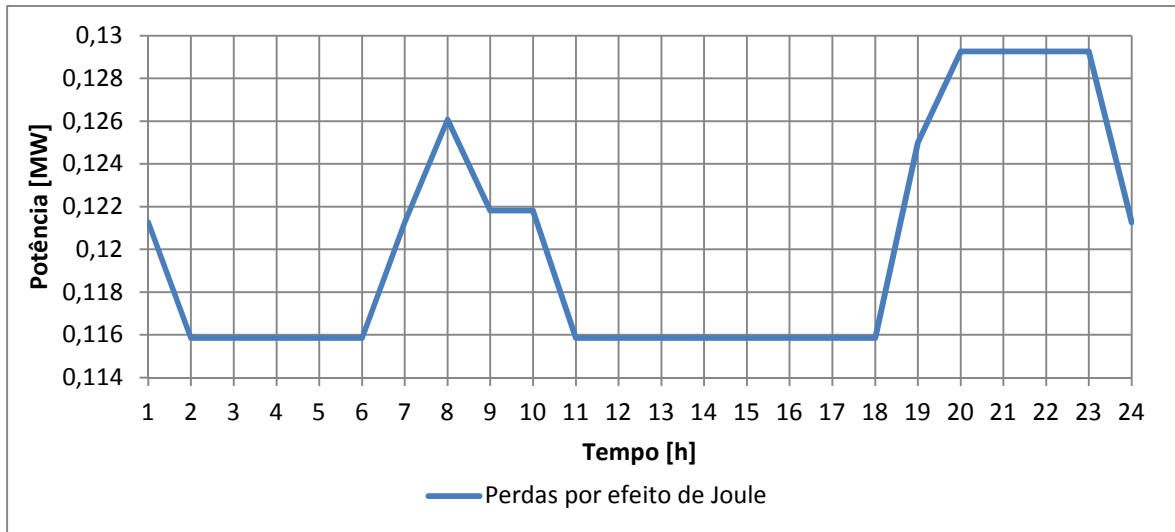



Figura 4.19 – Evolução das perdas por efeito de Joule.

A evolução das perdas por efeito de Joule é semelhante à evolução da geração coincidindo as horas de ponta com as horas onde as perdas são maiores. No total as perdas por efeito de Joule perfazem 2,88 kW.

<u>Análise com a integração do PEV</u>

Para que o carregamento das baterias tenha a menor influência possível na realização das tarefas requeridas pelo consumidor, considera-se que as baterias são carregadas entre as 0h e as 7h. No entanto o consumidor fica impossibilitado de utilizar o termoventilador das 0h às 2h. Para esta situação o diagrama de geração é o apresentado na Figura 4.20.

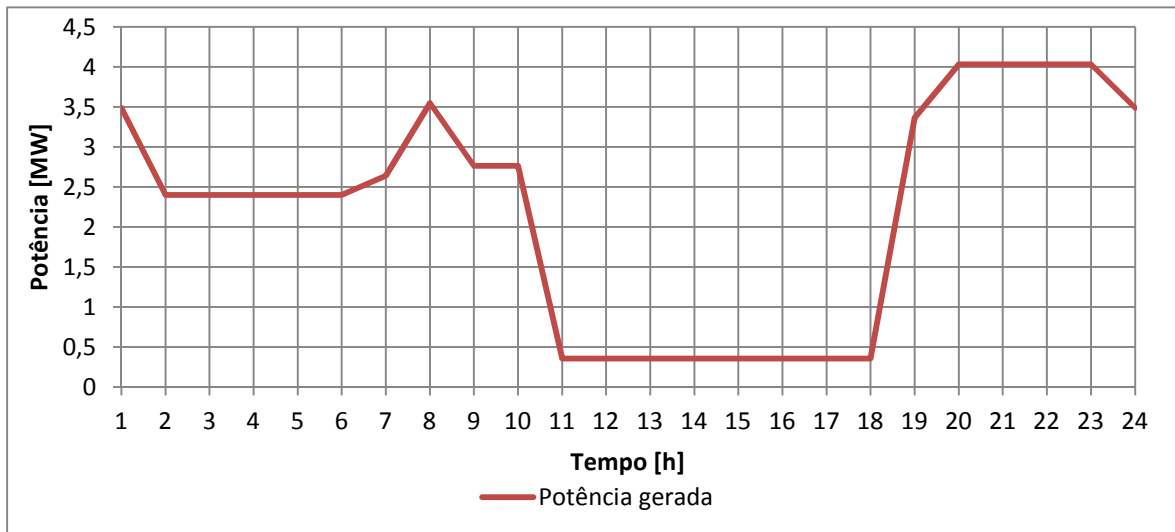



Figura 4.20 – Evolução da potência gerada na rede de energia elétrica.

Com o carregamento das baterias, verifica-se que a potência consumida no período de ponta mantém-se igual, já durante a noite reduziu-se a diferença entre a ponta e o vazio para cerca de 1,63MW no intervalo entre as 2h e as 6h, pois nesse período a potência consumida subiu dos 0,36MW para os 2,4MW. O diagrama de geração é mais uniforme que o diagrama apresentado na Figura 4.18, devido ao consumo das baterias. No entanto no intervalo entre as 11h e as 19h continua a haver uma potência de consumo muito baixa fazendo com que nesse período exista uma diferença de 3,67MW entre a ponta e o vazio.

A Figura 4.21 apresenta a evolução das perdas por efeito de Joule. O total desta potência é de 2,91MW representando um aumento 0,03MW em relação à situação sem integração do veículo elétrico devido à potência consumida pelas baterias, tal como era esperado.

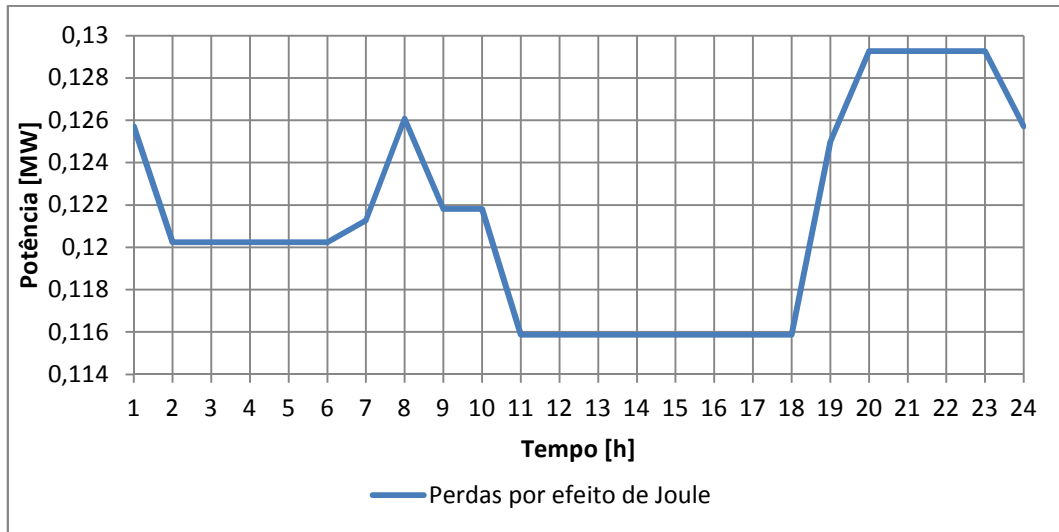



Figura 4.21 – Evolução das perdas por efeito de Joule.

Caso de estudo 2 – Regime normal

Análise com o modelo de DR

Utilizando o diagrama de consumo do caso de estudo 2 do subcapítulo 4.3, apresentado na Figura 4.8, avaliou-se o seu impacte na rede de energia elétrica. A Figura 4.22 apresenta a evolução da potência gerada na rede de energia elétrica.

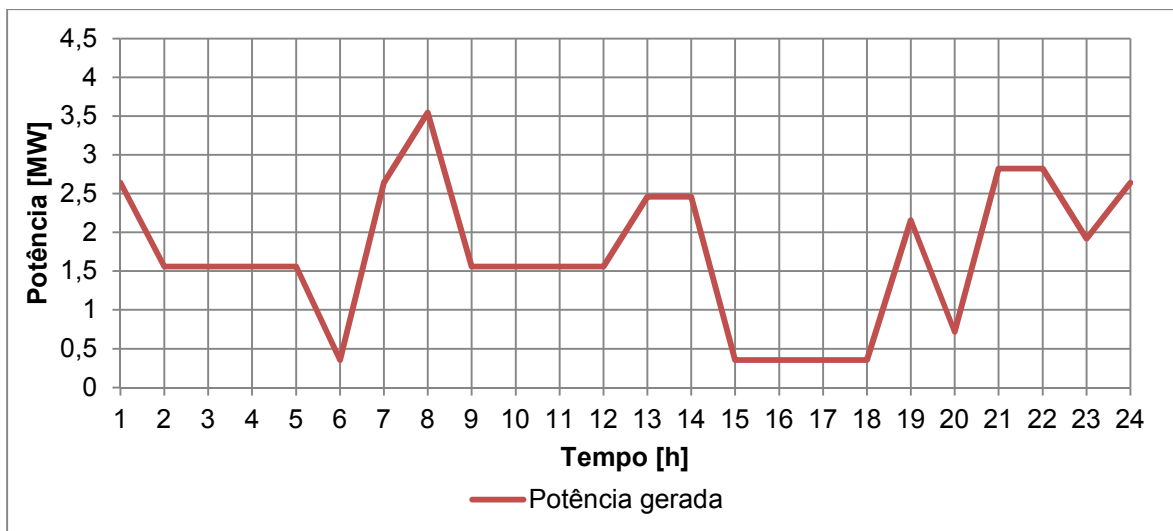



Figura 4.22 – Evolução da potência gerada na rede de energia elétrica.

Com a aplicação do modelo de DR verifica-se que, comparando a Figura 4.22 e a Figura 4.18 o diagrama de geração é mais uniforme que no caso de estudo 1. A potência máxima no período de ponta é de cerca 3,55MW sendo inferior em 0,48MW em relação ao caso de estudo 1, fazendo com que a diferença entre a potência no período de ponta e vazio seja menor, passando dos 3,67MW, no caso de estudo 1, para os 3,07MW.

Ao longo do dia também se verifica que o número de horas em que a potência nas horas de vazio é 0,48 MW é menor do que no primeiro caso de estudo permitindo um diagrama de geração mais uniforme. Isto verifica-se porque, os fornecedores de energia ao diminuírem o preço da eletricidade nas horas onde o consumo é menor e o aumentarem quando o consumo é elevado, incentivam o consumidor a alterar os seus hábitos e rotinas de forma a colocarem as cargas controláveis a funcionar nos períodos onde o preço da eletricidade é menor.

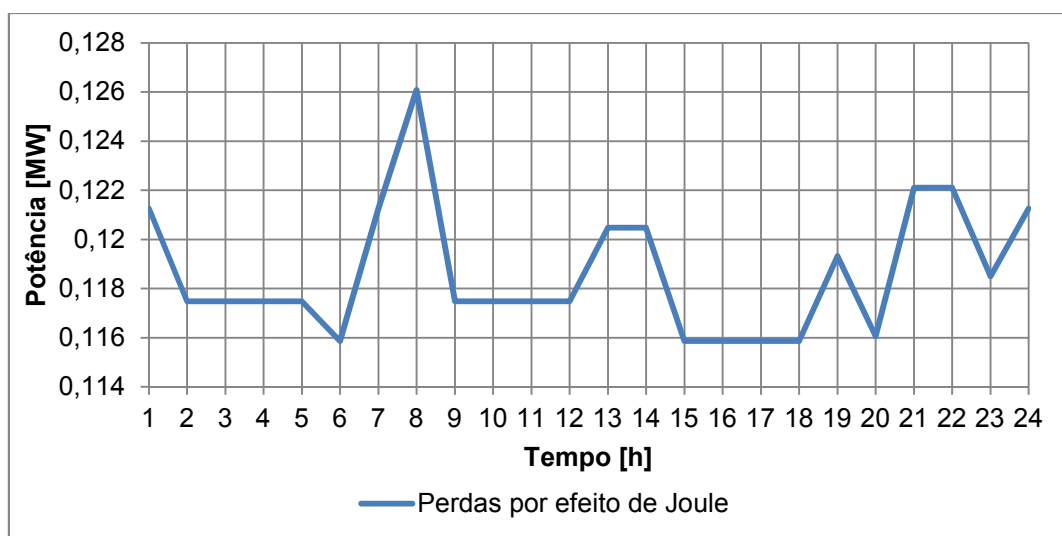



Figura 4.23 – Potência de perdas por efeito de Joule.

A potência de perdas por efeito de Joule é de 2,85MW enquanto no caso de estudo 1, sem integração do PEV, é de 2,88MW o que representa uma diminuição de 0,03MW. Isto acontece porque apesar de ao longo do dia o valor da potência nas horas de vazio ser maior, a potência consumida nas horas de ponta é menor do que no caso de estudo 1. Sendo a potência de perdas por efeito de Joule calculadas pela equação (4.3), significa que esta aumenta quadraticamente com a corrente, logo o aumento de um valor baixo de potência tem menor impacte

do que a diminuição de um valor alto de potência. Logo a diminuição da potência gerada de ponta tem maior relevância para a potência de perdas por efeito de Joule que o aumento da potência gerada de vazio.

$$P = RI^2 \qquad \textbf{(4.3)}$$

Onde P é a potência de perdas por efeito de Joule, R a resistência total da rede de energia elétrica e I a corrente total que transita na rede de energia elétrica.

Análise com o modelo de DR e integração do PEV

Nesta análise utilizou-se o diagrama de consumo representado na Figura 4.12 e avaliou-se o seu impacte na rede. A Figura 4.24 apresenta o diagrama de geração.

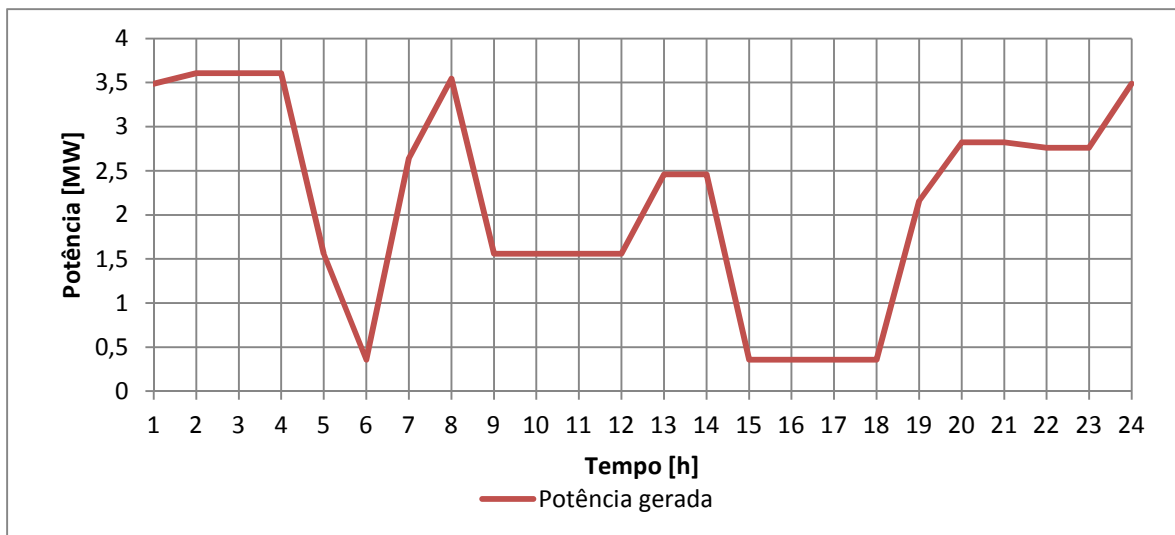



Figura 4.24 – Evolução da potência gerada na rede de energia elétrica.

Analisando a Figura 4.24 pode-se concluir que a potência de 3,61MW gerada nas horas onde as baterias são carregadas, é superior em relação à situação apresentada na Figura 4.22. No entanto fica a abaixo da potência de ponta verificada no caso de estudo 1 com o PEV, de acordo com a Figura 4.20 era de 4,03MW. Também se verifica que com a integração do PEV, não se aumenta a potência máxima durante os períodos de ponta.

A Figura 4.25 apresenta o diagrama de evolução da potência de perdas por efeito de Joule.

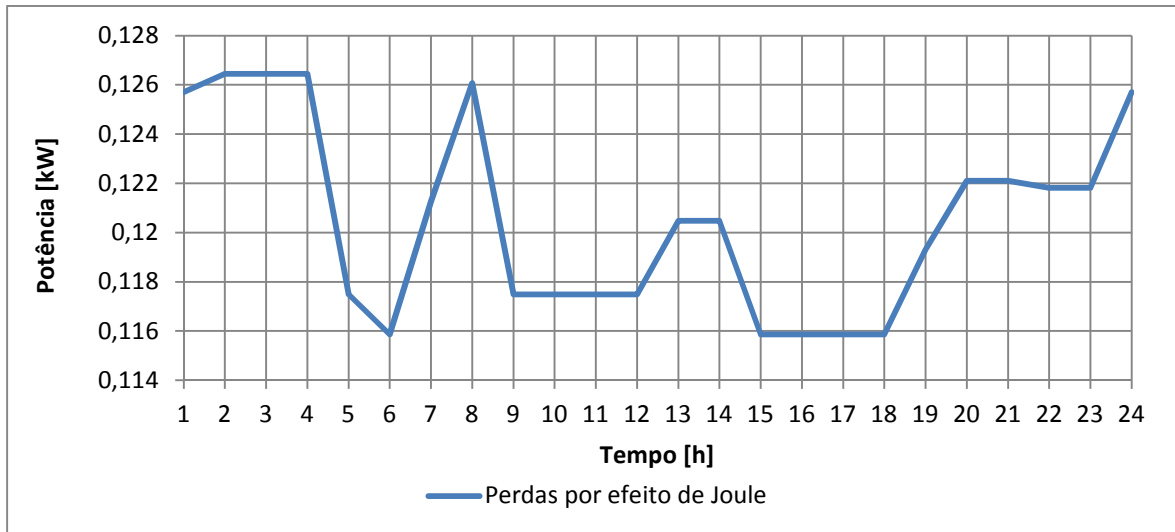



Figura 4.25 – Evolução da potência de perdas por efeito de Joule.

Relativamente à potência de perdas por efeito de Joule foram 2,89kW o que representa uma diminuição em relação à situação do caso de estudo 1 considerando o PEV em que essa potência é de 2,91MW.

Caso de estudo 3 – Regime de contingência

Neste cenário pretende-se apresentar o modelo DR como uma estratégia alternativa aos IBP no caso de uma ampla aplicação deste modelo a várias residências. A aplicação teria de ser ampla, uma vez que se pretende distribuir a necessidade de redução de potência pelos vários consumidores, sofrendo assim cada um, uma redução relativamente baixa de potência.

Com a possibilidade de comunicação em tempo real entre a rede de energia elétrica e o consumidor, poderá ser possível, por exemplo, indicar ao consumidor que num determinado intervalo de tempo a potência disponível vai ser menor, devido a uma contingência na rede. Isto dá tempo para o consumidor se adaptar ao novo diagrama de potência disponível de modo a que as suas tarefas possam ser realizadas.

No caso de estudo 3 no subcapítulo 4.3, apresentam-se os resultados de uma simulação com duas contingências, em que nas duas situações a potência disponível é limitada a 3kW. Dados estes valores para cada residência e tendo

em conta que a rede de energia elétrica aqui estudada é composta por 3 cargas com 200 residências cada uma, significa que a redução de potência é obtida pela equação (4.4).

$$
\begin{aligned}
P_{reduzida} &= P_{disponível} \times n_{bairros} \\
&\qquad \times n_{residencias} \\
P_{reduzida} &= 3 * 3 * 200 = 1.2MW
\end{aligned}
\quad \textbf{(4.4)}
$$

Onde $P_{reduzida}$ representa o valor da redução de potência a circular na rede de energia elétrica, $P_{disponível}$ é o valor da potência máxima disponível, $n_{bairros}$ é o número de bairros ligados à rede de energia elétrica e $n_{residencias}$ é o número de casas por bairro.

No caso de uma contingência desta natureza ser dividida por menos residências, por exemplo metade, significaria que a capacidade de redução de potência seria menor, bem como seria necessário que metade das casas não consumisse 6kW dos 6.9kW disponíveis, para atingir os mesmos 1.2MW

4.5. Conclusões

Considerando o caso de estudo 2 do subcapítulo 4.3, é possível concluir que o modelo respeita o limite de potência, não deixando que a potência consumida ultrapasse a potência disponível. Se o consumidor tem flexibilidade de horário para colocar as cargas controláveis em funcionamento poderá optar por um perfil económico ao longo do dia, no entanto para os casos onde o consumidor não disponha de muita flexibilidade, este poderá sempre adequar o perfil ao preço que pretende pagar. Verifica-se que no caso de estudo 2 um perfil que permita preços mais elevados permite que as cargas controláveis estejam mais tempo de disponíveis e portanto o consumidor poderá colocá-las em funcionamento em horários que melhor se adequem às suas rotinas. Provou-se também no caso de estudo 2, que tirando partido de todas as potencialidades do modelo e variando o perfil e o modo ao longo do dia, era possível concluir as mesmas tarefas executadas no caso de estudo 1 do subcapítulo 4.3. A diferença

entre os dois casos é que no caso de estudo 2, se apresenta um diagrama de consumo final, representando na Figura 4.8, que tenta pagar o menos possível pela eletricidade e por isso as cargas controláveis encontram-se mais distribuídas ao longo do dia.

Com a integração do veículo elétrico, de acordo com o caso de estudo 3 do subcapítulo 4.3, observou-se que a potência disponível para as cargas controláveis é menor, impedido que determinadas cargas controláveis estivessem disponíveis, levando o consumidor a ter maior flexibilidade e assim alterar o horário de funcionamento por forma a executar o maior número de tarefas que necessita.

O modelo DR sendo utilizado como uma estratégia de redução de carga por parte da rede de energia elétrica em caso de contingência planeada, permite que o consumidor possa receber essa informação antecipadamente e assim adaptar o seu consumo conforme as suas necessidades. No entanto mesmo em caso de contingência não planeada, as cargas mais prioritárias são as últimas a alterar o seu estado de disponível para indisponível, salvaguardando as opções do consumidor. Isto pode ser observado no caso de estudo 4 do subcapítulo 4.3.

Ao nível da rede de energia elétrica, com o caso de estudo 2, do subcapítulo 4.4 é possível observar que o diagrama de geração é mais uniforme do que o do caso de estudo 1, do mesmo subcapítulo, o que é positivo por forma a diminuir diferença entre a potência nas horas de ponta e a potência nas horas de vazio. Este modelo é uma ferramenta útil para modificar o diagrama de geração porque a influência do preço sobre o consumidor leva-o a optar por consumir nas horas onde o preço é mais barato, ou seja, quando existe muita geração e pouco consumo.

No subcapítulo 4.4 pode-se concluir que com a integração do modelo DR não só se diminui as perdas por efeito de Joule (Pperdas), bem como se promove a redução da diferença entre o valor da potência nas horas de ponta (Pponta) e a potência nas horas de vazio (Pvazio). Relativamente à integração do veículo elétrico, pode-se concluir que com o modelo DR resultam menos perdas por efeito

de Joule do que sem o modelo DR. Também se verifica que a integração do veículo elétrico com o modelo DR não resultou num aumento no valor da potência de ponta. A Tabela 4.1 sintetiza os resultados obtidos ao longo do subcapítulo 4.4.

Tabela 4.1 – Síntese do comportamento da rede de energia elétrica

Caso de estudo	Situação	Pperdas [MW]	Pponta [MW]	Pvazio [MW]
1	Sem PEV	2,88	4,03	0,36
	Com PEV	2,91	4,03	0,36
2	Sem PEV	2,85	3,55	0,36
	Com PEV	2,89	3,61	0,36

Com o caso de estudo 3, pode-se concluir que para a rede de energia elétrica a possibilidade que este modelo traz ao nível da capacidade de redução de potência será tanto maior quanto maior aderência dos consumidores ao modelo.

Capítulo 5

Conclusões e trabalho futuro

Resumo

Neste capítulo apresentam-se as conclusões de todo o trabalho dando relevo aos aspetos mais importantes. Também se apresenta sugestões para a continuidade deste trabalho.

5.1. Conclusões

Com a crescente necessidade de um fornecimento de energia elétrica mais fiável e de maior qualidade e com a crescente preocupação ambiental relativamente aos gases de efeito de estufa, a *Smart Grid* apresenta-se como um conceito que potencia o desenvolvimento e integração de novas tecnologias e novas unidades de produção de energia elétrica na rede de energia elétrica tradicional de forma a satisfazer essas necessidades.

Os programas de DR apresentam-se como uma estratégia que pretende conciliar a satisfação das necessidades de potência do consumidor com a necessidade de aumentar a eficiência energética da rede de energia elétrica. Esta estratégia tem como ferramenta base a comunicação bidirecional entre a rede de energia elétrica e o consumidor.

Foi desenvolvido um modelo DR recorrendo ao método de *fuzzy clustering*. Os pontos de informação determinados representam a relação entre os dados de entrada e de saída do modelo. Esta relação representa um comportamento DR de um consumidor. A informação de entrada é definida pelos estados das cargas controláveis requeridos pelo consumidor, pelo preço da eletricidade e pela potência disponível, dados pela rede de energia elétrica. A informação de saída do modelo são os estados possíveis das cargas controláveis, ou seja, indica se a carga controlável está disponível ou indisponível.

Os perfis e modos de consumo são definidos para que, de uma forma facilmente entendível atendendo a uma possível e desejável ampla aplicação, o modelo DR seja uma ferramenta que auxilie o consumidor na gestão das cargas controláveis. O modelo DR auxilia o consumidor a gerir o consumo das suas cargas controláveis ao preço da eletricidade adequado às suas necessidades de consumo. Os perfis permitem ao consumidor estabelecer os intervalos de preço da eletricidade que melhor se adequam às suas necessidades e os modos permitem estabelecer várias hierarquias de prioridades para as cargas controláveis facilitando ao consumidor a gestão no consumo da potência disponível.

Efetuou-se uma análise sobre a influência do modelo DR nos hábitos e rotinas do consumidor, visto que o consumidor é influenciado a utilizar as suas cargas controláveis nas horas onde o preço é menor. Estas alterações provocam um impacte no diagrama de consumo das residências e logo na rede de energia eléctrica, permitindo uma adequação entre o diagrama de consumo e o diagrama de geração.

O modelo beneficia quem tiver maior flexibilidade de utilização das cargas controláveis, pois significa que poderá consumir a potência disponível maioritariamente a um preço baixo. No entanto para os casos onde o consumidor não disponha de tanta flexibilidade de utilização das cargas controláveis, este poderá sempre adequar o perfil às suas necessidades de consumo. Com a integração do veículo elétrico verifica-se que o consumo da potência disponível para carregar as baterias tem por consequência a diminuição do tempo que cargas controláveis estão disponíveis. Isto leva a que o consumidor tenha uma maior flexibilidade de utilização das cargas controláveis ou que prescinda da utilização de algumas cargas controláveis para carregar as baterias. No caso de uma contingência na rede de energia elétrica que resulte na diminuição da potência disponível, as cargas mais prioritárias serão as últimas a serem desligadas, uma vez que o modelo é hierárquico.

Esta ferramenta também poderá ser útil aos operadores da rede de energia elétrica, porque, para além da possibilidade de influenciar o consumo através da variação do preço da electricidade, com as leituras dos *smart meters* os operadores podem analisar os dados dos diagramas de consumo e assim sugerir alterações aos perfis e modos do consumidor que sejam vantajosas, tanto para a rede de energia elétrica como para o consumidor.

5.2. Trabalho futuro

Neste trabalho foi considerado que, uma vez iniciado o programa de funcionamento das máquinas de lavar roupa, loiça e de secar, este não poderia ser interrompido e logo teria que funcionar até terminar. No entanto, havendo a

possibilidade de interromper os programas das máquinas, o consumidor poderá ter mais benefícios com este modelo DR, pois existirá maior flexibilidade de utilização e assim, por exemplo, colocar a máquina a funcionar apenas nas horas onde o preço é menor, mesmo não sendo horas consecutivas.

Uma vez que neste trabalho o despacho de potência e as características da rede de energia elétrica não se basearam em dados reais, como trabalho futuro poder-se-ia realizar o mesmo trabalho mas interligando despacho potência às necessidades de consumo, através do modelo DR, utilizando uma rede de energia elétrica real.

Neste trabalho a abordagem ao problema de DR foi técnica, não se tendo em conta a inclusão dos mercados de energia elétrica. No entanto, os mercados de energia elétrica poderão por em causa as soluções técnicas uma vez que os preços da eletricidade poderão evoluir de uma forma que as soluções técnicas não possam ser postas em prática. Portanto como trabalho futuro é interessante integrar a influência dos mercados elétricos neste trabalho.

Bibliografia

[1] Indian ETD Repository [Online]. Available: http://shodhganga.inflibnet.ac.in, 15 Agosto 2012

[2] S. E. Collier: Ten Steps to a Smart Grid. *IEEE Industry Applications Magazine,* 2010

[3] The European Electricity Grid Initiative: Roadmap 2010-18 and Detailed Implementation Plan 2010-12, 25 Maio 2010

[4] Lo , C., Ansari, N.: The Progressive Smart Grid System from Both Power and Communications Aspects. *IEEE Communications Surveys & Tutorials,* n.º 99, pp. 1-23, 2011

[5] Gharavi, H., Ghafurian, R.: Smart Grid: The Electric Energy System of the Future. *Proceedings of the IEEE,* vol. 99, n.º 6, pp. 917-921, junho 2011.

[6] Wang, H., Huang, Q.: A novel structure for smart grid oriented to low-carbon energy. *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2011 IEEE PES*, pp. 1-8, 2011

[7] Hossain, M. R., Oo , A. M. T., Ali, A. S.: Evolution of Smart Grid and Some Pertinent Issues. *Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 20th Australasian*, 2010

[8] Güngör, V. C., Sahin, D., Kocak , T., Ergüt, S., Buccella, C., Member, S., Cecati, C., Hancke, G. P., Member, S.: Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS,* vol. 7, pp. 529-539, 2011

[9] Fang, X., Misra, S., Xue, G., Yang, D.: Smart Grid The New and Improved Power Grid: A Survey. *Communications Surveys Tutorials, IEEE,* vol. PP, n.º 99, pp. 1-37, 2011

[10] COMISSÃO DAS COMUNIDADES EUROPEIAS: Estratégia europeia para uma energia sustentável, competitiva e segura. 2006

[11] European SmartGrids Technology: Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future. European Commission, 2006

[12] IEA: Technology Roadmap: Smart Grids. 2011

[13] Xu, Fang Yuan; Lai, Loi Lei: Scope design, charateristics and functionalities of Smart Grid. *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*, pp. 1-5, 24-29 Julho 2011

[14] Samotyj M., Howe, P. B.: Creating Tomorrow's Intelligent Electric Power Delivery System. *18th International Conference on Electricity Distribution*, Turin, pp. 1-5, 2005

[15] EU Commission Task Force for Smart Grids: Expert Group 1: Functionalities of smart grids and smart meters. 2010

[16] Saboori, H., Mohammadi, M., Taghe R.: Virtual Power Plant (VPP), Definition, Concept, Components and Types. *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Asia-Pacific*, pp. 1-4, 2011

[17] e-h eletric: Smart Grid and Virtual Power Plants. 2011

[18] Smart Grids Projects [Online]. Available: www.smartgridsprojects.eu, 14 Agosto 2012

[19] SGIC smart grid [Online]. Available: www.sgiclearinghouse.org, 14 Agosto 2012

[20] Haney, A. Brophy, Jamasb, T., Platchkov, L.M., Pollitt, M.G.: Demand-side Management Strategies and the Residential Sector: Lessons from International Experience. University of Cambridge: Electricity Policy Research Group, 2010

[21] Delgado, R., "Demand-side management alternatives," *Proceedings of the IEEE,* vol. 73, pp. 1471-1488, 1985

[22] European Environment Agency: Final electricity consumption by sector [Online]. Available: www.eea.europa.eu, 16 Agosto 2012

[23] ERSE, "Portal ERSE," [Online]. Available: http://www.erse.pt/pt/electricidade/simuladores/simuladordepotenciaacontratar/Documents/ERSEkw.html, 16 Agosto 2012

[24] Feenstra C.F.J., Backhaus J., Heiskanand E.: How to change consumers' energy-related behaviour? [On line]. Available: http://www.energychange.info, 20 Agosto 2012

[25] Ferreira, J.: Demand Side Management, Igenium, pp. 1–16. Available: http://www.jesusferreira.com.pt, 15 Agosto 2012

[26] Dabur, P., Singh, G., Yadav, N. K.: Electricity Demand Side Management: Various Concept and Prospects. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE),* vol.1, pp. 1-16, 2012

[27] Malik , O., Havel , P.: Analysing demand-side management potential: Situation in Europe and the Czech Republic. *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2011 10th International Conference on*, pp.1-4, 8-11 Maio 2011

[28] Boshell , F., Veloza, O.: Review of developed demand side management programs including different concepts and their results. *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America,* 2008 *IEEE/PES*, pp.1-7, 13-15 Agosto 2008

[29] Torriti , J., Hassan , M. G., Leach M.: Demand response experience in Europe: policies, programmes and implementation. *Energy,* vol. 35, Issue 4, pp. 1575--1583, 2010

[30] Stromback J.: The Development of Demand Response in Europe. *Smart Grid Technology Conference*, Sheraton Mission Valley, San Diego, 2010

[31] Batlle, C., Rodilla, P.: Electricity demand response tools: current status and outstanding issues. *European Review of Energy Markets,* vol. 3, issue 2, pp. 1-27, 2009

[32] Finn, J.: Enabling Demand Response: Overcoming Barriers to Time of Use Rates. Brown University-The Center for Environmental Studies, 2007

[33] Aalami H., Yousefi, G., Moghadam, M.: Demand Response model considering EDRP and TOU programs. *Transmission and Distribution*

Conference and Exposition, T&D. IEEE/PES, pp. 1-6, 21-24 Abril 2008

[34] Albadi, M., El-Saadany, E.: Demand Response in Electricity Markets: An Overview. *Power Engineering Society General Meeting*, IEEE, pp. 1-5, 24-28 Junho 2007

[35] Kneeshaw, S.: Electric Vehicles in Urban Europe Baseline Report-URBACT II network," EVAUE, 2010

[36] Comissão Europeia: Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system. Bruxelas, 2011

[37] Ministério da Economia da Inovação e do Desenvolvimento: Plano Novas Energias ENE 2020, 2010

[38] Saber, A.Y., Venayagamoorthy, G.K.: One million plug-in electric vehicles on the road by 2015. *ITSC '09, 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp.1-7, 4-7 Outubro 2009

[39] Silva, V., Caleno, F., Vidal, N.: Session II – Impact of Electro-Mobility on Electricity Networks. Grid for Vehicles, Bruxelas, 2011

[40] Hadley, S. W.: Impact of Plug-in Hybrid Vehicles on the Electric Grid. OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, 2006

[41] Hammouda K.: A Comparative Study of Data Clustering Techniques. Tools of intelligent Systems Design, vol. 625, pp.1-21, 2000

[42] Chiu, S. L.: Fuzzy model identification based on cluster estimation. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems,* vol. 2, pp. 267-278, 1994

[43] Yager, R. R., Filev D. P.: Approximate clustering via the mountain method. IEEE Transactions On Man And Cybernetics Systems, vol. 24, no. 8, p.1279–1284, 1994

[44] Takagi, T., Sugeno, M.: Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Man and Cybernetics Systems*, vol. SMC15, pp. 116 -132, 1985

[45] DGGE/IP-3E: Eficiência energética em equipamentos e sistemas eléctricos no sector residencial. Lisboa, 2004

[46] Clement-Nyns, K., Haesen, E., Driesen, J.: The Impact of Charging Plug-In Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid. *IEEE Transactions on Power Systems,* vol. 25, pp. 371-380, 2010

[47] Masoum, A.S., Deilami, S., Moses, P.S., Abu-Siada, A.: Impacts of battery charging rates of Plug-in Electric Vehicle on smart grid distribution systems. 2010 IEEE PES, pp. 1-8, 2010

[48] Lopes, J., Soares, F., Almeida, P.: Identifying management procedures to deal with connection of Electric Vehicles in the grid. Bucharest *PowerTech*, IEEE, pp. 1-8, 2009

[49] Turker, H., Bacha, S., Chatroux, D.: Impact of Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs) on the French electric grid. *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*, 2010 IEEE PES, pp. 1-8, 2010

[50] Ingvar, N., Persson, C.: Vehicle to Grid State of the Art System Design - Plug

In Hybrid Electric Vehicles as source of power for the control markets in Sweden and Germany. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2010

[51] Babaei, S.: Plug-in Hybrid Electric Vehicles and Distributed Generations in Power Systems: Effects and Penetration Level Studies. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2010

[52] Electric Powertrains. MIT Electric Vehicle Team, 2008

[53] Reis, L.: Modelo e sistema de carregamento para veículos eléctricos em portugal. Seminário mobilidade eléctrica: o veículo. 8 Março 2010

Apêndices

Apêndice 1

Mountain clustering é uma técnica de *clustering* formulada por Ronald Yager e Dimitar Filev e publicada em [43]. Este método cria uma rede com n interseções de acordo com a dimensão do conjunto de dados de treino, em que cada dado é designado por ponto de informação. Utilizando uma função, designada função montanha, calcula-se a densidade de pontos de informação à volta de cada interseção da rede. Este cálculo dá o potencial de cada interseção ser um *cluster center*. A função montanha é dada pela equação 1.

$$P_i = \sum_{j=1}^{n} \mathrm{e}^{-\alpha \|x_i - x_j\|^2} \quad (1)$$

Onde x_i representa o i-enésimo ponto de informação, P_i representa o seu potencial para ser um *cluster center*, *n* representa o número de pontos de informação, x_j representa o *j*-enésimo ponto de informação vizinho de x_i e *α* é dado pela equação 2

$$\alpha = \frac{4}{r_a^2} \quad (2)$$

Onde r_a é uma constante positiva que representa o raio que define até que distância é que um ponto de informação é considerado vizinho.

Depois de calculada a densidade dos pontos, o primeiro *cluster* é definido pelo centro da maior densidade calculada. Depois elimina-se esse *cluster* e avalia-se o centro de maior densidade existente, repetindo-se o processo até todos os pontos pertencerem a um *cluster*.

Um dos problemas deste método é o facto de o tempo de computação depender quer da quantidade de dados de entrada, como da dimensão do problema. Pois quanto maior for a dimensão mais redes e intersecções são necessárias avaliar. Um exemplo disso, segundo [42], é um problema de *clustering* com 4 variáveis em que cada rede teria, por exemplo, uma resolução de 10, o que equivale a uma rede de 10 por 10. A computação teria de avaliar 10^4 intersecções possíveis de serem *clusters centers*.

A descrição do funcionamento desta técnica pode ser devida em 3 passos. Esses passos são explicados a seguir:

1. Cria-se um conjunto de redes com uma dada resolução, como na figura 1, em que o número de redes é função do número de variáveis de entrada, tabela 1 em que k é o número de pontos de informação. Cada intersecção de cada rede é candidata a *cluster center*.
2. Introdução dos dados a agrupar e construção da função montanha, equação 1. Esta função vai avaliar a densidade de pontos para cada possível *cluster center*. Essa avaliação é feita através do cálculo da sua distância ao *cluster center*, em que é atribuído um valor ao ponto de informação que é tanto maior quanto maior for a sua proximidade ao *cluster center*.
3. Selecção dos *cluster centers*. O primeiro *cluster center* é atribuído ao de maior densidade de pontos. De seguida o efeito deste *cluster* é eliminado avaliando-se de seguida qual o *cluster center* de maior densidade de pontos, repetindo-se este processo até ao último *cluster*.

k	x	y
1	0,36	0,85
2	0,65	0,89
3	0,62	0,55
4	0,50	0,75
5	0,35	1
6	0,90	0,35
7	1	0,24
8	0,99	0,55
9	0,83	0,36
10	0,88	0,43

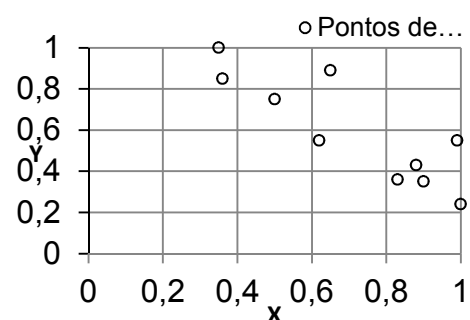



Tabela 1 – Pontos de informação

Figura 1 – Rede.

Apêndice 2

Tabela 1 – Dados de entrada para perfil económico

				Prioridade				
Potência disponível	Preço	Perfil	Modo	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª
6500	1	Economico	Conforto	1	1	1	1	1
6500	1	Economico	Asseio	1	1	1	1	1
6300	1	Economico	Asseio	1	1	1	1	1
6000	1	Economico	Asseio	1	1	1	1	1
6000	1	Economico	Asseio	1	1	1	1	1
5900	3	Economico	Conforto	1	1	1	1	1
5300	3	Economico	Conforto	1	1	1	1	1
0	3	Economico	Conforto	1	1	1	1	1
5400	2	Economico	Asseio	1	1	1	1	1
5400	2	Economico	Asseio	1	1	1	1	1
5600	2	Economico	Asseio	1	1	1	1	1
5800	2	Economico	Asseio	1	1	1	1	1
5800	2	Economico	Asseio	1	1	1	1	1
5800	2	Economico	Asseio	1	1	1	1	1
5600	2	Economico	Asseio	1	1	1	1	1
5400	2	Economico	Asseio	1	1	1	1	1
5400	2	Economico	Asseio	1	1	1	1	1
5600	3	Economico	Asseio	1	1	1	1	1
2800	3	Economico	Conforto	1	1	1	1	1
5400	3	Economico	Conforto	1	1	1	1	1
5500	2	Economico	Conforto	1	1	1	1	1
5700	1	Economico	Conforto	1	1	1	1	1
5900	1	Economico	Conforto	1	1	1	1	1
6500	1	Economico	Conforto	1	1	1	1	1

Tabela 2 – Dados de entrada para perfil moderado

				Prioridade				
Potência disponível	Preço	Perfil	Modo	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª
6500	1	Moderado	Conforto	1	1	1	1	1
6500	1	Moderado	Asseio	1	1	1	1	1
6300	1	Moderado	Asseio	1	1	1	1	1
6000	1	Moderado	Asseio	1	1	1	1	1
6000	1	Moderado	Asseio	1	1	1	1	1
5900	3	Moderado	Conforto	1	1	1	1	1
5300	3	Moderado	Conforto	1	1	1	1	1
0	3	Moderado	Conforto	1	1	1	1	1
5400	2	Moderado	Asseio	1	1	1	1	1
5400	2	Moderado	Asseio	1	1	1	1	1
5600	2	Moderado	Asseio	1	1	1	1	1
5800	2	Moderado	Asseio	1	1	1	1	1
5800	2	Moderado	Asseio	1	1	1	1	1
5800	2	Moderado	Asseio	1	1	1	1	1
5600	2	Moderado	Asseio	1	1	1	1	1
5400	2	Moderado	Asseio	1	1	1	1	1
5400	2	Moderado	Asseio	1	1	1	1	1
5600	3	Moderado	Asseio	1	1	1	1	1
2800	3	Moderado	Conforto	1	1	1	1	1
5400	3	Moderado	Conforto	1	1	1	1	1
5500	2	Moderado	Conforto	1	1	1	1	1
5700	1	Moderado	Conforto	1	1	1	1	1
5900	1	Moderado	Conforto	1	1	1	1	1
6500	1	Moderado	Conforto	1	1	1	1	1

Apêndice 3

Tabela 1 – Parte dos conjuntos de dados do perfil económico modo asseio

Situação	Loica	Roupa	Secar	AC	Termoventilador	Potência	Preço		Loica	Roupa	Secar	AC	Termoventilador
1	2000	2000	3500	1800	2000	6400	1		2000	2000	0	0	0
2	0	2000	3500	1800	2000	6400	1		0	2000	3500	0	0
3	0	0	3500	1800	2000	6400	1		0	0	3500	1800	0
4	0	0	0	1800	2000	6400	1		0	0	0	1800	2000

Tabela 2 - Parte dos conjuntos de dados do perfil económico modo asseio

Situação	Loica	Roupa	Secar	AC	Termoventilador	Potência	Preço		Loica	Roupa	Secar	AC	Termoventilador
1	2000	2000	3500	1800	2000	1900	1		0	0	0	1800	0
2	0	2000	3500	1800	2000	1900	1		0	0	0	1800	0
3	0	0	3500	1800	2000	1900	1		0	0	0	1800	0
4	0	0	0	1800	2000	1900	1		0	0	0	1800	0
5	0	0	0	0	2000	1900	1		0	0	0	1800	0

Apêndice 4

Tabela 1 – Relatorio do simulador para perfil moderado

Numero	Loica	Roupa	Secar	AC	Termo	Perfil	Modo
1	2000	0	0	1800	2000	Moderado	Conforto
2	2000	0	3500	0	0	Moderado	Asseio
3	2000	0	3500	0	0	Moderado	Asseio
4	2000	0	3500	0	0	Moderado	Asseio
5	2000	0	3500	0	0	Moderado	Asseio
6	Moderado: Preco demasiado elevado para o perfil atual						
7	Moderado: Preco demasiado elevado para o perfil atual						
8	Moderado: Preco demasiado elevado para o perfil atual						
9	2000	0	0	0	0	Moderado	Asseio
10	2000	0	0	0	0	Moderado	Asseio
11	2000	0	3500	0	0	Moderado	Asseio
12	2000	0	3500	0	0	Moderado	Asseio
13	2000	0	3500	0	0	Moderado	Asseio
14	2000	0	3500	0	0	Moderado	Asseio
15	2000	0	3500	0	0	Moderado	Asseio
16	2000	0	0	0	0	Moderado	Asseio
17	2000	0	0	0	0	Moderado	Asseio
18	Moderado: Preco demasiado elevado para o perfil atual						
19	Moderado: Preco demasiado elevado para o perfil atual						
20	Moderado: Preco demasiado elevado para o perfil atual						
21	0	0	0	1800	2000	Moderado	Conforto
22	0	0	0	1800	2000	Moderado	Conforto
23	2000	0	0	1800	2000	Moderado	Conforto
24	2000	0	0	1800	2000	Moderado	Conforto

Apêndice 5

Tabela 1 - Relatório do simulador para perfil económico

Numero	Loica	Roupa	Secar	AC	Termo	Perfil	Modo
1	2000	0	0	1800	2000	Economico	Conforto
2	2000	2000	0	0	0	Economico	Asseio
3	2000	2000	0	0	0	Economico	Asseio
4	2000	2000	0	0	0	Economico	Asseio
5	2000	2000	0	0	0	Economico	Asseio
6	Economico: Preco demasiado elevado para o perfil atual						
7	Economico: Preco demasiado elevado para o perfil atual						
8	Não existe potencia disponivel para cargas controlaveis						
9	Economico: Preco demasiado elevado para o perfil atual						
10	Economico: Preco demasiado elevado para o perfil atual						
11	Economico: Preco demasiado elevado para o perfil atual						
12	Economico: Preco demasiado elevado para o perfil atual						
13	Economico: Preco demasiado elevado para o perfil atual						
14	Economico: Preco demasiado elevado para o perfil atual						
15	Economico: Preco demasiado elevado para o perfil atual						
16	Economico: Preco demasiado elevado para o perfil atual						
17	Economico: Preco demasiado elevado para o perfil atual						
18	Economico: Preco demasiado elevado para o perfil atual						
19	Economico: Preco demasiado elevado para o perfil atual						
20	Economico: Preco demasiado elevado para o perfil atual						
21	Economico: Preco demasiado elevado para o perfil atual						
22	0	0	0	1800	2000	Economico	Conforto
23	2000	0	0	1800	2000	Economico	Conforto
24	2000	0	0	1800	2000	Economico	Conforto

Apêndice 6

Tabela 1 – Dados de entrada para perfil ideal.

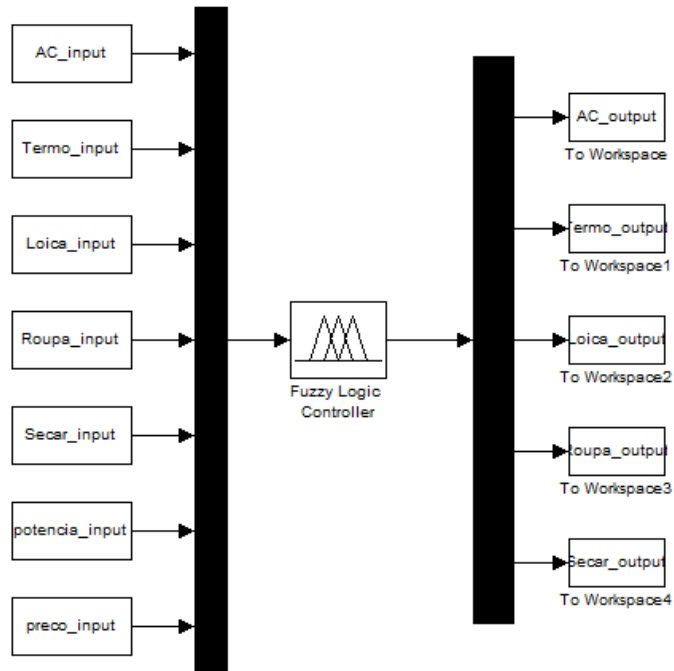
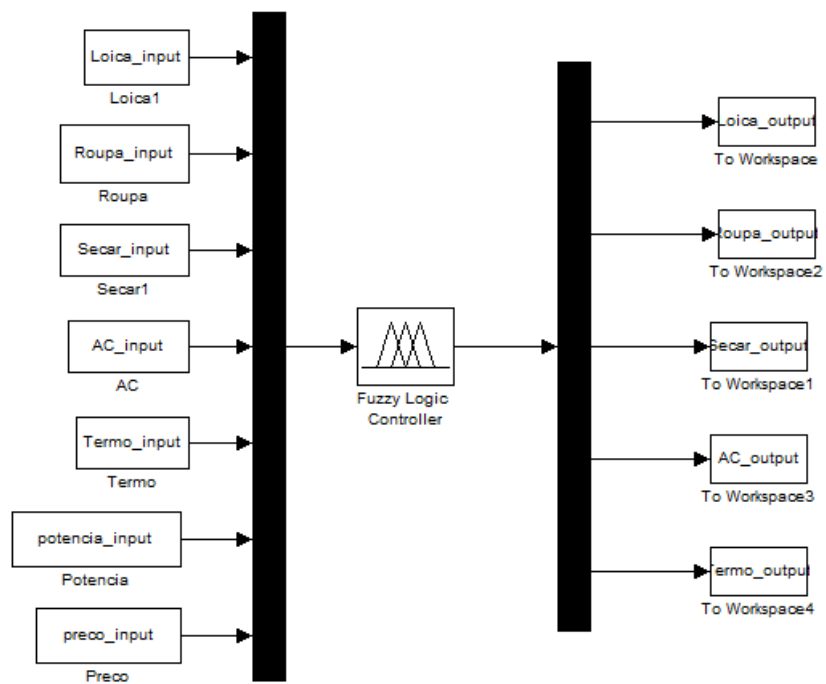
				Prioridade				
Potência disponível	Preço	Perfil	Modo	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª
6500	1	Moderado	Conforto	1	1	1	1	1
6500	1	Moderado	Asseio	1	1	1	1	1
6300	1	Moderado	Asseio	1	1	1	1	1
6000	1	Moderado	Asseio	0	1	1	1	1
6000	1	Moderado	Asseio	0	1	1	1	1
5900	3	Moderado	Conforto	1	1	1	1	1
5300	3	Moderado	Conforto	1	1	1	1	1
0	3	Moderado	Conforto	1	1	1	1	1
5400	2	Moderado	Asseio	1	1	1	1	1
5400	2	Moderado	Asseio	1	1	1	1	1
5600	2	Moderado	Asseio	1	1	1	1	1
5800	2	Moderado	Asseio	1	1	1	1	1
5800	2	Moderado	Asseio	0	0	1	1	1
5800	2	Moderado	Asseio	0	0	1	1	1
5600	2	Moderado	Asseio	1	1	1	1	1
5400	2	Moderado	Asseio	1	1	1	1	1
5400	2	Moderado	Asseio	1	1	1	1	1
5600	3	Moderado	Asseio	1	1	1	1	1
2800	3	Moderado	Conforto	1	1	1	1	1
5400	3	Moderado	Conforto	1	1	1	1	1
5500	2	Moderado	Conforto	0	0	1	1	1
5700	1	Moderado	Conforto	0	0	1	1	1
5900	1	Moderado	Conforto	1	1	1	1	1
6500	1	Moderado	Conforto	1	1	1	1	1

Apêndice 7

Tabela 1 – Relatório do simulador para perfil ideal sem PEV

Numero	Loica	Roupa	Secar	AC	Termo	Perfil	Modo
1	2000	0	0	1800	2000	Economico	Conforto
2	2000	2000	0	0	0	Economico	Asseio
3	2000	2000	0	0	0	Economico	Asseio
4	0	2000	3500	0	0	Economico	Asseio
5	0	2000	3500	0	0	Economico	Asseio
6	2000	0	0	1800	2000	Exigente	Conforto
7	0	0	0	1800	2000	Exigente	Conforto
8	Não existe potência disponível para cargas controláveis						
9	2000	2000	0	0	0	Moderado	Asseio
10	2000	2000	0	0	0	Moderado	Asseio
11	2000	2000	0	0	0	Moderado	Asseio
12	2000	2000	0	0	0	Moderado	Asseio
13	0	0	3500	1800	0	Moderado	Asseio
14	0	0	3500	1800	0	Moderado	Asseio
15	2000	2000	0	0	0	Moderado	Asseio
16	2000	2000	0	0	0	Moderado	Asseio
17	2000	2000	0	0	0	Moderado	Asseio
18	2000	2000	0	0	0	Exigente	Asseio
19	0	0	0	1800	0	Exigente	Conforto
20	0	0	0	1800	2000	Exigente	Conforto
21	0	0	3500	1800	0	Moderado	Asseio
22	0	0	3500	1800	0	Economico	Asseio
23	2000	0	0	1800	2000	Economico	Conforto
24	2000	0	0	1800	2000	Economico	Conforto

Apêndice 8

Modelo SIMULINK para modo conforto

Modelo SIMULINK para modo asseio

Apêndice 9

<u>Código para criar um controlador *fuzzy* através da técnica *subtractive clustering*.</u>

```
clc
clear

%importacao de dados para treino
inputdata =
xlsread('D:\ISEL\TESE\zMATLAB\Testes_Subtractive\Economico\Asseio\Dados_E
conomico_Asseio.xlsx');
i=1:1:210;

%alocação dos dados nas respetivas variaveis
%%Input
Loica=inputdata(i,2);
Roupa=inputdata(i,3);
Secar=inputdata(i,4);
AC=inputdata(i,5);
Termo=inputdata(i,6);
potencia=inputdata(i,7);
preco=inputdata(i,8);
train_input=[Loica Roupa Secar AC Termo potencia preco];

%%Output
Loicao=inputdata(i,10);
Roupao=inputdata(i,11);
Secaro=inputdata(i,12);
ACo=inputdata(i,13);
Termoo=inputdata(i,14);
train_output=[Loicao Roupao Secaro ACo Termoo];


%Geraçao das regras fuzzy através da técnica subtractive clustering
myfis=genfis2(train_input,train_output,1.5);

%Atribuir o nome de cada variável no toolbox fuzzy
myfis = setfis(myfis, 'input',1,'name','Loica');
myfis = setfis(myfis, 'input',2,'name','Roupa');
myfis = setfis(myfis, 'input',3,'name','Secar');
myfis = setfis(myfis, 'input',4,'name','AC');
myfis = setfis(myfis, 'input',5,'name','Termo');
myfis = setfis(myfis, 'input',6,'name','Potencia');
myfis = setfis(myfis, 'input',7,'name','Preco');
myfis = setfis(myfis, 'output',1,'name','Loicao');
myfis = setfis(myfis, 'output',2,'name','Roupao');
myfis = setfis(myfis, 'output',3,'name','Secaro');
myfis = setfis(myfis, 'output',4,'name','ACo');
myfis = setfis(myfis, 'output',5,'name','Termoo');

%Abrir a toolbox fuzzy com as configurações anteriores
fuzzy(myfis);
```

Apêndice 10

Código parcial do simulador do modelo DR.

```
%Ler dados do excel
[ndata, text, alldata]=xlsread('Cenario5\Cenario 5.xlsx');
i=1:1:24;
num=ndata(i,1);
potencia_in=ndata(i,5);
preco_in=ndata(i,6);
perfil=text(i,7);
modo=text(i,8);
input1=ndata(i,9);
input2=ndata(i,10);
input3=ndata(i,11);
input4=ndata(i,12);
input5=ndata(i,13);


%Condições e simulação do controlo
w=1;

Loica=2000;
Roupa=2000;
Secar=3500;
AC=1800;
Termo=2000;

file=fopen('Cenario5\Resultado_Cenario 5.txt','wt');
while(w<=nhoras)
    if(potencia_in(w)<=1800)
        if(w==1)
            fprintf(file,'Numero\t Loica\t Roupa\t Secar\t AC\t Termo\t
Perfil\t Modo\n');
        end
        fprintf(file,'%4.0f,\t 0,\t 0,\t 0,\t 0,\t 0,\t Não existe
potencia disponivel para cargas controlaveis\n',w);
        display('SIMULOU')
    else
        PF=strcmp(perfil(w),'Economico');
        if(PF==1)
            if(preco_in(w)==1)
                TF=strcmp(modo(w),'Asseio');
                if (TF==1)
                    if(input1(w)==1)
                        Loica_input=2000;
                    else
                        Loica_input=0;
                    end
                    if (input2==1)
                        Roupa_input=2000;
                    else
                        Roupa_input=0;
                    end
                    if (input3==1)
                        Secar_input=3500;
```

```
else
    Secar_input=0;
end
if (input4==1)
    AC_input=1800;
else
    AC_input=0;
end

if (input5==1)
    Termo_input=2000;
else
    Termo_input=0;
end
potencia_input=potencia_in(w);
preco_input=preco_in(w);

controlof=readfis('Economico_Asseio_7_1_5');
sim('Economico_Asseio');

if(Loica_output(1)<(Loica/2))
    Loica_output(1)=0;
else
    Loica_output(1)=Loica;
end
if(Roupa_output(1)<(Roupa/2))
    Roupa_output(1)=0;
else
    Roupa_output(1)=Roupa;
end
if(Secar_output(1)<(Secar/2))
    Secar_output(1)=0;
else
    Secar_output(1)=Secar;
end
if(AC_output(1)<(AC/2))
    AC_output(1)=0;
else
    AC_output(1)=AC;
end
if(Termo_output(1)<(Termo/2))
    Termo_output(1)=0;
else
    Termo_output(1)=Termo;
end
```

```
                    if(w==1)
                       fprintf(file,'Numero\t Loica\t Roupa\t Secar\t
AC\t Termo\t Perfil\t    Modo\n');
                   end
                   fprintf(file,'%4.0f,\t %4.0f,\t %4.0f,\t %4.0f,\t
%4.0f,\t %4.0f,\t %s, %s\n',w, Loica_output(1), Roupa_output(1),
Secar_output(1), AC_output(1), Termo_output(1), perfil{w}, modo{w});
                   display('SIMULOU')
               end
```

……

```
               TF=strcmp(modo(w),'Conforto');
               if (TF==1)
                   if(input1(w)==1)
                       AC_input=1800;
                   else
                       AC_input=0;
                   end
                   if (input2(w)==1)
                       Termo_input=2000;
                   else
                       Termo_input=0;
                   end
                   if (input3(w)==1)
                       Loica_input=2000;
                   else
                       Loica_input=0;
                   end
                   if (input4(w)==1)
                       Roupa_input=2000;
                   else
                       Roupa_input=0;
                   end

                   if (input5(w)==1)
                       Secar_input=3500;
                   else
                       Secar_input=0;
                   end
               potencia_input=potencia_in(w);
               preco_input=preco_in(w);

               controlof=readfis('Gastador_Conforto_8_1_5');
               sim('Gastador_Conforto')

               if(Loica_output(1)<(Loica/2))
                       Loica_output(1)=0;
                   else
                       Loica_output(1)=Loica;
                   end
                   if(Roupa_output(1)<(Roupa/2))
                       Roupa_output(1)=0;
                   else
                       Roupa_output(1)=Roupa;
                   end
                   if(Secar_output(1)<(Secar/2))
```

```
                    Secar_output(1)=0;
                else
                    Secar_output(1)=Secar;
                end
                if(AC_output(1)<(AC/2))
                    AC_output(1)=0;
                else
                    AC_output(1)=AC;
                end
                if(Termo_output(1)<(Termo/2))
                    Termo_output(1)=0;
                else
                    Termo_output(1)=Termo;
                end

                if(w==1)
                    fprintf(file,'Numero\t Loica\t Roupa\t Secar\t
AC\t Termo\t Perfil\t    Modo\n');
                end
                fprintf(file,'%4.0f,\t %4.0f,\t %4.0f,\t %4.0f,\t
%4.0f,\t %4.0f,\t %s, %s\n',w, Loica_output(1), Roupa_output(1),
Secar_output(1), AC_output(1), Termo_output(1), perfil{w}, modo{w});
                display('SIMULOU')
            end
        else
            if(w==1)
                    fprintf(file,'Numero\t Loica\t Roupa\t Secar\t
AC\t Termo\t Perfil\t    Modo\n');
            end
            fprintf(file,'%4.0f,\t 0,\t 0,\t 0,\t 0,\t 0,\t Gastador:
Preco demasiado elevado para o perfil atual\n', w);
        end
    end
end
    w=w+1
end
display('Fim de simulação')
fclose('all');
```

Apêndice 11

Tabela 1 – Características das linhas

Linha				
Do barramento	Para o barramento	Resistência	Reatância	Admitância
1	2	0,08	0,24	0,025
1	3	0,02	0,18	0,02
1	4	0,04	0,12	0,015
2	3	0,01	0,03	0,035
3	4	0,08	0,24	0,035

Apêndice 12

Artigo publicado na *4th Doctoral Conference on Computing, Electrical and Insdustrial Systems*.

Demand Response Analysis in Smart Grids Using Fuzzy Clustering Model

R. Pereira[1,2], A. Fagundes[2], R. Melício[1], V.M.F. Mendes[2], J. Figueiredo[1], J. Martins[3], J.C. Quadrado[2]

[1] University of Évora, Évora, Portugal, ruimelicio@uevora.pt
[2] Lisbon Superior Engineering Institute - ISEL, Lisbon, Portugal, rpereira@deea.isel.pt
[3] Center of Technology and Systems, University Nova de Lisboa, Lisbon, Portugal

Abstract. This paper focuses on an analysis of demand response in a smart grid context, presenting the model considerations and architecture. Domestic consumption is divided into groups in order to cover the adequate modeling. A fuzzy subtractive clustering method is applied to demand response on several domestic consumption scenarios and results analyses are presented. The demand response developed model aims to support consumers decisions regarding their consumption needs and possible economical benefits.

Keywords: Demand response, smart grid, fuzzy subtractive clustering.

1 Introduction

The smart grid engages consumer active role. This is crucial for grid management in order to efficiently ensure electric energy generation and usage. For instance, time-scheduling or shedding of load requirements is more favorable when consumer has an active role. Demand Side Management (DSM) such as energy efficiency, energy conservation and Demand Response (DR) programs [1] are required in order to adequate the profile of energy load diagram to generation. DR aims at shaping energy usage in some specified time periods with opportunely economic advantage due to adequate balance between load and generation. The shaping is attained by a modus operandi efficiently taking into account the need to apply time-scheduling or shedding of the load. The modus operandi is intended not only at lowering expenditures, such as the ones resulting from the need to call utilities expensive peaking power plants in short-time or to avoid building new

power plant in order to satisfy future forecasted augmented energy consumption needs; but also in case of impossibility to avoid new power plants building, then chiefly discarding the ones with anthropogenic greenhouse gases emission [2]. Already, a European Union program started in 2008 for decreasing the end-user consumption is on effect, aiming to achieve 1 % reduction in energy consumption in the following nine years [3]. Consumers have to be persuaded to adhere to a smart grid environment and be an active element in the smart grid management, implying the necessity to furnish adequate conveniences to take advantage of the capabilities given by smart grid. DR techniques allows the accomplishment of shifting or decreasing the energy usage in several economic activity sectors, bringing benefits not only to consumers, but also to grid operators due to a reduction in system operation costs [4].

In this paper the consumer´s active role in grid management is supported by a DR method developed using a fuzzy clustering model. The developed methodology provides the consumer an intended efficient tool which allows to support consumer decisions on load management regarding their consumption needs and consumption priorities along one day, taking into consideration the associated costs and possible economical benefits. The desirable massive consumer adherence to DR actions justifies a consumption pattern definition for the model implementation. This consumption pattern justifies the fuzzy clustering techniques applied.

This paper focuses on DR actions and modeling, giving details and results analysis. Domestic consumers are the target of the paper and are divided accordingly to their consumption profiles into three groups. Each group has an equipment priority list of Controllable Loads (CL) to be accomplished, considering for the decision on load satisfaction the available generation capacity and the energy price. Also, consumer non-controllable loads are considered.

The rest of the paper is organized as follows: Section 2 presents the contribution to innovation on DR involving research and customization of programming techniques. Section 3 presents aspects about DSM and DR. Section 4 presents DR model case study main assumptions. Section 5 presents the fuzzy

subtractive clustering method to be applied to consumption scenarios. Section 6 presents results analysis based on the scenarios. Finally, concluding remarks are given in Section 7.

2 Relationship to Internet of Things

Internet of Things (IoT) is a name conceived to accommodate an extension of the web paradigm in order to consider the connection, monitoring and control of devices: things of everyday life [5].

The smart grid characteristics [6], the expectation to spread intelligence and control from some central core over peripheral nodes on electric energy usage entails the need to research, test and customize computing techniques for DR analysis, enabling opportune interfacing management of energy usage [5].

The DR analysis in this paper is on a line of technological contributions tied with the IoT aptitude to: (i) collect data on energy usage, (ii) provide this data to other participants on local utility grid, and (iii) get energy prices information [7].

3 Demand Side Management and Demand Response

The oil shocks of the 1970s brought a new research concerning policies and measures targeting energy demand. Since then development of DR and energy efficiency policies are on the way, aiming to influence quantities or patterns of energy [8]. A discussion and analyze DSM appeared in 1985 with alternatives related to load shape benefits derived from techniques concerning, for instance: valley filling of utility's loads, clipping of peaks, shifting of loads to off peak hours, strategic conservation to reduce demand [9]. DSM became more ambitious with smart metering in domestic buildings and services and bidirectional communication provided in smart grids.

DR allows load adaptation to the generation; this adaptation is important due to the intermittent characteristic of renewable energy sources integrated into the electric grid. DR programs are mainly conditioned by grids requests and consumers have to adapt the consumption in order to take advantage of

economical benefits. DR is defined as any program which communicates with the consumer and either enables or encourages the consumer to lower or shift energy consumption during periods of unfavorable energy prices to favorable periods [10]. DR programs can be divided into: Incentive-Based Programs (IBP) and Time-Based Programs (TBP) [11].

4 Demand Response Model Case Study

The proposed model is a TBP one, aiming to support consumer's decision and actions on load management also referred as CL management, taking into consideration the available power capacity and energy price. This TBP model intends to give consumers flexibility in order to take advantage of economical benefits allowing the load management that best fits consumer's profiles or life-styles. Consumers load management is possible throughout methods of load time-scheduling and load shedding. The economical benefits mainly come from valley filling of utilities' loads and shifting of loads to off peak hours.

The model assumes that grid power dispatch provides hourly information to consumers about available power and energy price. The assumptions considered in the model are the following: available power is considered non-constant along the time horizon to emulate available distributed generation behavior and consequently allowing a convenient DR modeling; consumer can deselect priority on a CL in order to allow available power to the next priority CL; once the in progress power sum of CL reaches the total available power, no further CL can be connected. These assumptions are intended to give to the consumer an opportunity to adapt the consumption diagram to what the consumer is willing to pay for energy price.

The consumers' profiles and operation modes were obtained from analysis of consumption behavior that allowed a consumption pattern definition. Three consumer profiles were set to ensure the coverage of DR generalization on the model and help consumers cope with price changes over one day period. These three consumer profiles were designated as follows: economic, moderate and extravagant. Two operation modes designated by cleaning and comfort are set for

each consumer profile. An example of a priority list is shown in Table 1. In table 1 the CL priority list is the same for the three profiles because it guarantees that consumer decision is obeyed independently of the selected profile, regarding the energy price. For example, if economical profile is selected but for one time period the energy price is superior to the one allowed for the economical profile, consumer can change his profile to moderate, keeping the same CL priority list but with increased costs. Also, a common CL priority list to the three profiles allows a DR model comparison analysis for the scenarios considered in this study.

Table 1. Controllable load priority list for cleaning mode

Economic profile	Moderate profile	Extravagant profile
	1 Dishwasher	
	2 Washing machine	
	3 Dry Machine	
	4 Air Conditioner	
	5 Thermo ventilation	
Low price	Low or medium price	Low, medium or high price

The economic profile is set to allow only the use a CL when the energy price is low. The moderate profile is set to allow the use a CL when energy price is low or medium and in extravagant profile any CL could be used independently of energy price. The necessity of pattern recognition associated with a control which supports consumers' decisions for DR model design is fulfilled using fuzzy clustering method. The controller is implemented in the Matlab-Simulink® software resorting to the Fuzzy Logic Toolbox.

The demand response model is shown in Fig. 1.

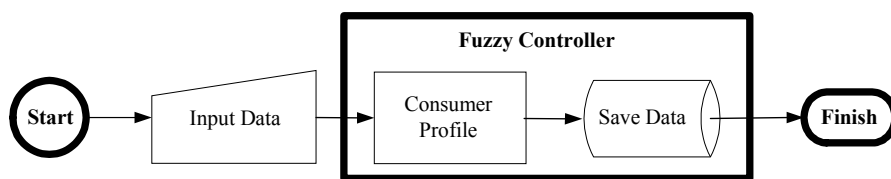



Fig. 1. Demand response model.

The input data was set considering one residence with 6.9 kVA of installed power and the CL are home appliances and air conditioner with nominal reference power given in [12]. The model input data are chosen considering CL consumption stages, available power and energy price. The reactive power is neglected.

The consumption stages assumed are the null power or the reference nominal power, i.e., for the air conditioner the consumption stages are off power or full power, which is 1.8 kW. Nevertheless, the model is valid for any other consumption stages introduced as input data. The model is applied considering a power range between 1.8 kW and 6.9 kW, respectively given by the CL lower value and the installed electric power value.

5 Fuzzy Clustering Model

The required DR behavior is standardized in an Excel sheet by creating relations between the input and output parameters desired for the DR model. In order to represent the DR behavior in a fuzzy controller, data clustering technique was used. Given an input, available in the Excel data sheet, data clustering apprehends the pattern in it and gives the outputs. The outputs are cluster centers corresponding to the pattern, which can be utilized in a fuzzy controller. Each cluster center is composed by twelve elements. A total of 7 inputs are considered. These inputs are given by: 5 CL consumption states required by the consumer, the energy price and the available power. And 5 outputs given by the 5 CL states.

Data clustering techniques are necessary due to the fact that otherwise the required number of rules is a large number in order to acceptably define the fuzzy controller. Fuzzy clustering consists on a strategic division of the data space into fuzzy clusters.

Each fuzzy cluster is introduced in order to stand for the convenient representation of one specific part of system behavior. After projecting the clusters onto the input space, the antecedent parts of the fuzzy rules can be found [13].

The subtractive clustering technique is an extension of the mountain clustering method based on data sets evaluated using mountain function resulting in cluster centers. Accordingly to this technique, given a collection of n data points in an m-dimensional space, the technique starts by setting each data point x_i as a potential cluster center with a defined potential in function of the Euclidian distances of all data points. This function, specifying the potential at x_i, is given by

$$P_i = \sum_{j=1}^{n} e^{-\alpha \| x_i - x_j \|^2}. \quad \textbf{(1)}$$

α is a parameter given by,

$$\alpha = 4 / r_a^2. \quad \textbf{(2)}$$

r_a is the cluster radius, setting a hypersphere of data points with significant influence on the cluster center potential in order to be acknowledged as neighbors.

The r_a value has a strong effect on the numbers of the generated cluster. Three observation about this value are in order: a data point outside a neighborhood of radius r_a has little influence on the potential of the neighborhood center data point; a higher value for r_a generally results in a generation of few clusters and therefore a model too generalized; while a low value can lead to an excessive generation of clusters and therefore a model that has not enough generalization [14]. The r_a values were chosen in order to introduce an adequate amount of clusters which are related to the resulting number of fuzzy rules. The r_a parameter can be adjusted based on the required model complexity and generalization ability. In this paper the r_a values determined resulted in a rules number which allowed an adequate control action with an adequate model time response. Hence, it was considered that no major advantages arrived with improved mathematical methods or optimization methods applied on the r_a determination. The values for r_a are shown in Table 2.

The subtractive clustering technique after computing all the data point potentials, using the expression (1), identifies the first cluster center as the data point with the highest potential.

Table 2. Fuzzy rules number and r_a value

Profile	Operation mode	Rules number	r_a
Moderate	Cleaning	14	1.4
	Comfort	10	1.5

Then, the potential of the data point is revised using the assignment given by

$$P_i \Leftarrow P_i - P_1^* e^{-\beta \| x_i - x_1^* \|^2}. \quad \textbf{(3)}$$

In (3) P_1^* and x_1^* are respectively the first cluster center potential value and center location, β is a parameter given by

$$\beta = 4/(\eta\, r_a)^2. \quad \textbf{(4)}$$

In (4) η is the squash factor defining the neighborhood of data points that will have significant measurable reduction in the potential value. Normally, a value of η = 1.5 is a good choice. After the first cluster center has been obtained and all the potential of the data points have been revised using the procedure given by assignment (3), the data point with the highest potential is selected as second cluster center. In general, after k^{th} cluster center has been obtained, the potential of each data point is revised using the assignment given by

$$P_i \Leftarrow P_i - P_k^* e^{-\beta \| x_i - x_k^* \|^2}. \quad \textbf{(5)}$$

In (5) P_k^* and x_k^* are respectively the k^{th} cluster center potential value and center location. A description of further details about the subtractive clustering technique

employed in this paper can be seen in [14]. Fuzzy rules are defined based on valid cluster centers. The assumptions considered in the model presented in section 4 and the data sets to be submitted to the subtractive clustering technique were implemented in Excel®. Each profile and respective operation modes have a proper data set. A file with Matlab® extension .m was created, where the function *genfis2* perform the subtractive clustering technique on the data sets. Then the Matlab® function *fuzzy* is applied, which allows articulating the created clusters into if-then rules, establishing the fuzzy control saved in a file with Matlab® extension .fis.

Other approach, such as neural networks (NN) can be applied to the model controller. However, for the model implementation in NN the required data sets characteristics in association with the controllable loads power consumption initial value definition, revealed a controller design complexity which have leaded to considerably more time dispended in this model implementation then with the fuzzy clustering model developed.

6 Results Analysis

Two scenario analyses are performed with and without the DR model, considering a residence with a limited power of 6.9 kVA and with a base power consumption shown in Fig. 3. The base power consumption represents the consumption of all loads excluding the CL.

The first scenario, shown in Fig. 2, refers to a consumption diagram where no planning or restriction to CL connection exists, i.e., no DR model is on consideration. This scenario considers that, when consumers are at home and awake the consumption is high and limited by the 6.9 kVA, otherwise the consumption values are low and limited by the base power consumption. This scenario is used as a comparison basis between the consumption diagram where no planning or restriction to CL connection exists and a consumption diagram resulting from the DR model.

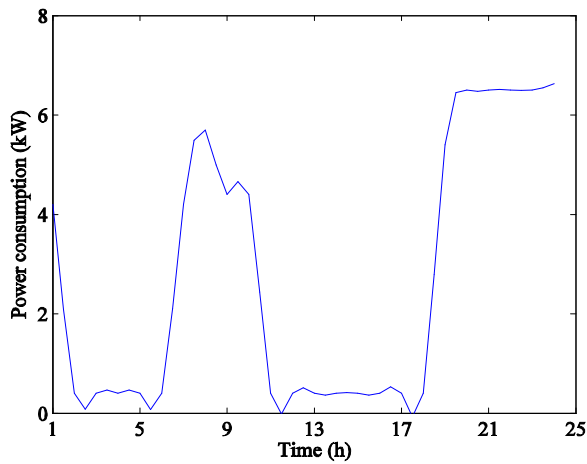



Fig. 2. Power consumption of consumer in first scenario.

The second scenario has data information, shown in Fig. 3, about power and energy prices available in one day period on an hourly basis and consumer selects operation mode accordingly with – when at home and awake, comfort mode is selected, otherwise cleaning mode is selected, considering two hypotheses: i) consumer sets an economic profile; ii) consumer sets a moderate profile.

The input data to simulate the DR model for moderate profile is shown in Fig. 3.

A comparison between Fig. 2 and both DR model responses shown in Fig. 4 and Fig. 5, shows the influence of price on consumer consumption. On Fig. 2 the consumer is not influenced by the price because it is always the same, so the consumer consumes where is more convenient. On the other hand, accordingly to Fig. 4 and Fig. 5, the consumer is concerned with the price because it changes along one day, so the consumer reschedules the CL in a way to be connected on hours where the price is lower. A comparison of responses in the second scenario from hypotheses i), Fig. 4 and ii), Fig. 5, shows for the moderate profile that CL has more favorable conditions to be connected in one day period, than for the economic profile. Hence, the consumer is subjected to a lesser restricted DR due to the higher acceptance of the energy price in moderate profile than in economic

profile. The extravagant profile allows the consumer a DR only depending on available power. It can be observed in Fig. 4 and Fig. 5 that DR model guarantees that the sum of base power consumption with CL consumption power is never superior to the available power. The individual CL power consumption for moderate profile in one day period is presented in Fig. 6.

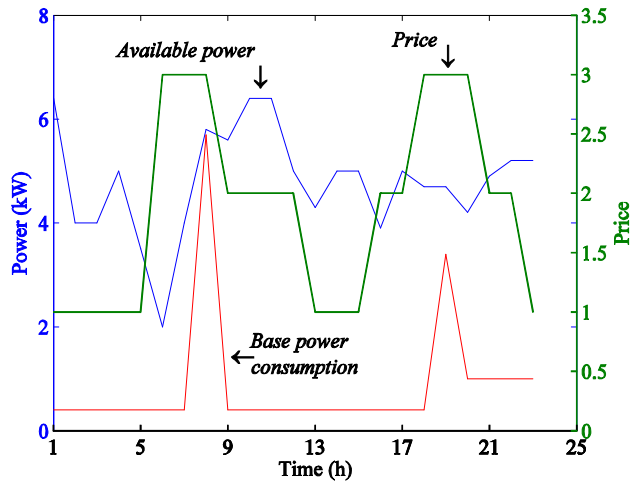



Fig. 3. Base power consumption, available power and price evolution.

Together, both Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5 and Fig. 6 allow to confirm that the energy price is satisfactory associated with CL power consumption.

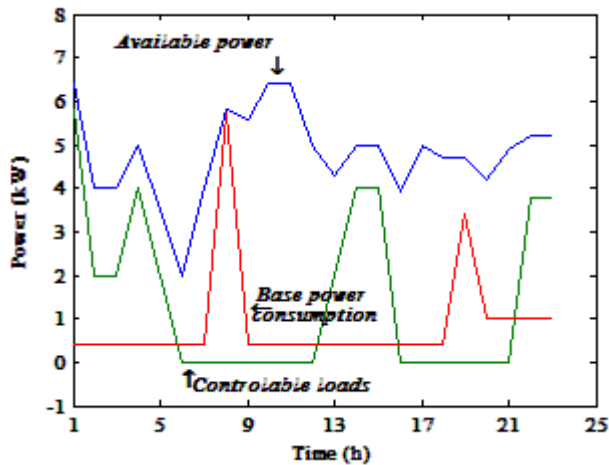



Fig. 4. Power evolution for economic profile.

Both Fig. 3 and Fig. 6 allow to conclude that in the time period between 6 a.m and 8 a.m there is no CL available because the energy price is higher than the energy price assigned to moderate profile. The analysis of Fig. 5 and Fig. 6 allows to conclude that only at 8 a.m there is no sufficient power available to connect any CL. However, regarding the energy price shown in Fig. 3 and taking into account the defined CL priority list shown in Table 1, no CL is connected in the period between 6 a.m and 8 a.m as shown in Fig. 6.

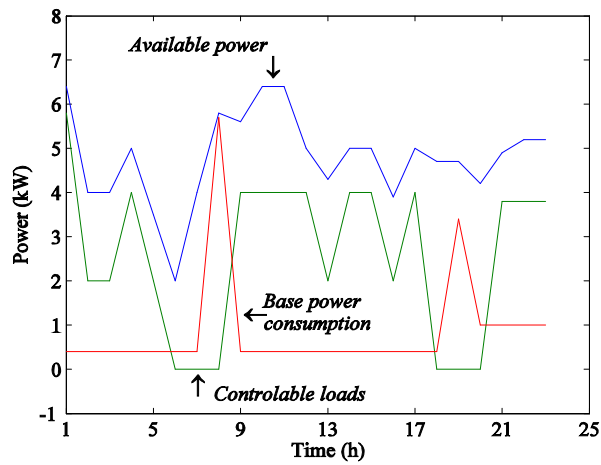



Fig. 5. Power evolution for moderate profile. ´

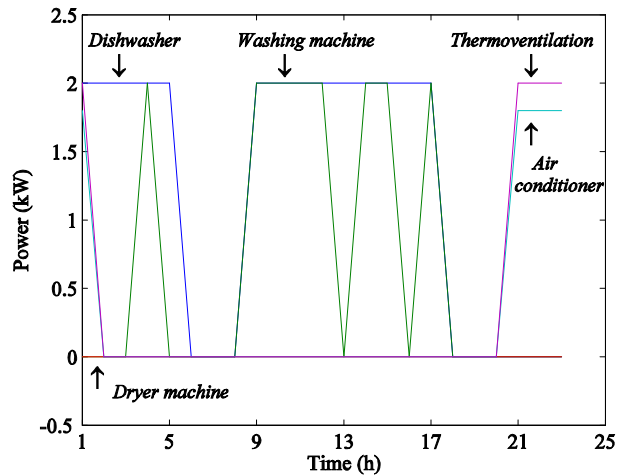



Fig. 6. Controllable loads evolution stage for moderate profile.

7 Conclusion

The proposed model ensures that power consumption is never superior to the available power and that no CL can be connected if energy price is superior to the correspondent energy price assigned to the selected consumption profile.

Consumer is subjected to a lesser restricted DR in moderate and extravagant profiles than in economic profile due to a higher acceptance of the energy price.

The consumption diagram can be shaped by the price changes along one day, which can lead to a more efficient grid because the consumption diagram can be conveniently adapted as it can be seen by comparison between the first and second scenarios, where a flatten diagram is desirable.

Consumer evidences a flexibility on consumption schedule when data on available power and on energy price are to be taken into account in due time. Hence, collecting and providing data on energy usage to participants on local grid, having energy prices information and model development, as the one proposed in this paper, are crucial for IoT to conveniently assist on a successful DR.

References

1. Boshell F., Veloza O.P.: Review of developed demand side management programs including different concepts and their results. In Proc. on Trans. Dist. Conf. Exp.: Latin America, pp.1–7, Bogota, Colombia, (2008)
2. Johnson K., Thomas E.: The fundamentals of liking demand side management strategies with program implementation tactics, [On line]. Available: http:// www.utilityexchange.org, 27 June (2012)
3. Feenstra C.F.J., Backhaus J., Heiskanand E.: How to change consumers' energy-related behaviour? [On line]. Available: http://www.energychange.info, 20 August (2012)
4. Ferreira, J.: Demand Side Management, Igenium, pp. 1–16. Available: http://www.jesusferreira.com.pt, 15 August (2012)
5. Bui N., Castellani A.P., Casari P.,Zorzi M.: The internet of energy: a web-enabled smart grid system. Network, vol. 26, pp. 39–45 (2012)
6. Yun M., Yuxin B.: Research on the architecture and key technology of internet of things (loT). In Proc. IEEE Int. Conf. on Adv. in Energy Eng., pp. 69–72, Beijing, China, (2010)
7. Ciuciu I., Meersman R. Dillon T.: Social network of smart-metered homes and SMEs for grid-based renewable energy exchange. In Proc 6th IEEE Int. Conf. Digital Ecosystems Tech. – DEST, pp 1–6, Campione d'Italia, Italy, (2012)
8. Haney A.B., Jamasb T., Platchkov L.M.,Pollitt M.G.: Demand-side management strategies and the residential sector: lessons from international experience. EPRG, University of Cambridge, (2010)
9. Delgado R.M..: Demand-side management alternatives. Proceedings of IEEE, vol. 73, pp. 1471–1488 (1985)
10. Stromback J.: The development of demand response in Europe. In Proc. Smart Grid Tech. Conf. and Exhib., San Diego, USA, (2010)
11. Aalami H., Yousefi G.R., Moghadam M.: Demand response model considering EDRP and TOU programs. In Proc. IEEE Trans. Distri. Conf. and Exp., pp. 1–6, Chicago, USA, (2008)

12.ERSE,[Online]. Available: http://www.erse.pt, 23 July (2012)
13.Priyono A., Ridwan M., Alias A.J., Atiq R., Rahmat O.k., Hassan A., Ali M.A.M.: Generation of fuzzy rules with subtractive clustering. Jurnal Teknologi, 43, pp.143–153 (2005)
14. Chiu, S. L: Fuzzy model identification based on cluster estimation. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*,* vol. 2, pp. 267–278 (1994)